

Treball de Fi de Grau/Màster

Enginyeria en Tecnologies Industrials

Anàlisi de xarxes elèctriques. Sistemes de potència

MEMÒRIA

Autor: Albert Gili Selga
Director: Francesc Girbau i Llistuella
Daniel Montesinos Miracle
Convocatòria: Juny 2018



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

Les xarxes elèctriques són sistemes que es caracteritzen per la seva facilitat en presentar problemes relacionats amb la qualitat del subministrament i la mitigació d'aquests no és quelcom trivial

L'objectiu del projecte és dissenyar digitalment una eina que permeti realitzar simulacions de xarxes elèctriques per analitzar-les, i que també, aquesta eina deixi poder afegir en aquestes xarxes solucions per a la atenuació dels seus possibles problemes de subministrament.

Un cop aquesta eina estigui dissenyada, es caracteritza una solució concreta que ajuda a millorar la qualitat de subministrament de les xarxes que s'analitzen i es realitza un estudi comparatiu on es tenen en compte els resultats quan es té la solució implementada o bé quan no li té. Amb els resultats d'aquest estudi es conclou la funcionalitat de l'eina i l'eficiència de la solució aplicada.

SUMARI

1. GLOSSARI	11
2. INTRODUCCIÓ	12
2.1. Objectiu del projecte	12
2.2. Abast del projecte	12
3. ESTAT DE L'ART	13
3.1. Xarxa elèctrica	13
3.2. Sistema de distribució en baixa tensió.....	18
3.2.1. Sistema trifàsic desequilibrat.....	18
3.2.2. Potència reactiva	19
3.2.3. Pertorbacions elèctriques.....	20
3.3. Mitigació d'errors.....	23
3.3.1. Electrònica de potència.....	24
4. EINA PER A LA MODELITZACIÓ, MITIGACIÓ I QUANTIFICACIÓ DELS PROBLEMES	27
4.1. Disseny conceptual de l'eina	27
4.2. Prototip per mitigar els problemes relacionats amb la qualitat del subministrament.....	30
4.3. Quantificació dels problemes.....	32
5. CASOS D'ESTUDI	34
5.1. Xarxa alfa.....	35
5.2. Xarxa beta.....	37
6. RESULTATS I DISCUSSIÓ	40
6.1. Xarxa amb consum irregular i pics de reactiva	40
6.1.1. Sense prototip mitigador	40
6.1.2. Amb prototip mitigador	43
6.2. Xarxa amb consum cíclic.....	50
6.2.1. Sense prototip mitigador	50
6.2.2. Amb prototip mitigador	53
7. PLANIFICACIÓ	60
8. PRESSUPOST	61
8.1. Recursos humans.....	61
8.2. Recursos materials i energètics.....	61

8.3. Cost final del projecte	62
9. IMPACTE AMBIENTAL	63
10. CONCLUSIONS	64
11. AGRAÏMENTS	65
12. BIBLIOGRAFIA	66
13. ANNEX	69
13.1. Teorema de les components simètriques i transformacions vectorials Clarke i Park	69
13.2. Disseny de l'eina en SIMULINK	72
13.2.1. Bloc xarxa	73
13.2.2. Bloc càrrega controlada	75
13.2.3. Bloc mesuradors i indicadors	77
13.3. Disseny prototip mitigador	80

Índex de figures

Figura 3.1 Esquema general d'una xarxa elèctrica [font pròpia]	13
Figura 3.2 Connexió trifàsica amb neutre [font pròpia]	15
Figura 3.3 Representació vectorial de les potències d'un sistema trifàsic	16
Figura 3.4 Representació vectorial de les potències d'un sistema trifàsic amb distorsió	17
Figura 3.5 Esquema de les possibles causes d'un desequilibri en un sistema trifàsic	19
Figura 3.6 Representació d'una ona afectada per impulsos transitoris [17].....	21
Figura 3.7 Representació d'una interrupció [17]	21
Figura 3.8 Representació d'una baixada de tensió (esquerra) i una subtensió (dreta) [17]..	22
Figura 3.9 Representació d'un augment de tensió (esquerra) i d'una sobretensió (dreta) [17]	22
Figura 3.10 Representació de variació de freqüència [17]	22
Figura 4.1 Esquema conceptual del disseny de l'eina per realitzar simulacions.....	27
Figura 4.2 Esquema d'un controlador PI	31
Figura 4.3 Esquema del funcionament del prototipus mitigador	32
Figura 5.1 Sistema trifàsic dels corrents de la xarxa alfa sense el prototip connectat	35
Figura 5.2 Potència reactiva per cada fase de la xarxa alfa	36
Figura 5.3 Potència reactiva per cada fase de la xarxa alfa sense transitoris	36
Figura 5.4 Sistema trifàsic dels corrents de la xarxa beta sense el controlador connectat...	37
Figura 5.5 Sistema trifàsic dels corrents de la xarxa beta d'un cicle sense el controlador connectat.....	38
Figura 5.6 Sistema trifàsic dels corrents de la xarxa beta d'un cicle amb hores sense el controlador connectat.....	38
Figura 6.1 Sistema trifàsic de tensions i corrents en el tram de temps amb més desequilibri	

.....	40
Figura 6.2 Potències actives de cada fase desequilibris	41
Figura 6.3 Factor de potència de cada fase de la xarxa	42
Figura 6.4 Sistema trifàsic dels corrents equilibrats gràcies al controlador connectat a la xarxa	44
Figura 6.5 Sistema trifàsic de tensions i corrents equilibrats on era el tram de temps amb més desequilibri	44
Figura 6.6 Potències actives de cada fase vistes des de la xarxa i la càrrega	45
Figura 6.7 Potència reactiva de la fase a vista des de la xarxa i la càrrega.....	46
Figura 6.8 Potència reactiva de la fase b vista des de la xarxa i la càrrega.....	46
Figura 6.9 Potència reactiva de la fase c vista des de la xarxa i la càrrega.....	46
Figura 6.10 f.d.p. de la fase a vista des de la xarxa i la càrrega	47
Figura 6.11 f.d.p. de la fase b vista des de la xarxa i la càrrega	48
Figura 6.12 f.d.p. de la fase c vista des de la xarxa i la càrrega	48
Figura 6.13 Sistema trifàsic de tensions i corrents en el tram de temps amb més desequilibri	50
Figura 6.14 Potència activa de les tres fases de la xarxa en el tram d'un dia.....	50
Figura 6.15 Potència reactiva de cada fase de la xarxa en el tram d'un dia.....	51
Figura 6.16 Factor de potència de cada fase de la xarxa en un dia	52
Figura 6.17 Sistema trifàsic dels corrents equilibrats gràcies al prototip connectat a la xarxa	53
Figura 6.18 Sistema trifàsic de tensions i corrents equilibrats en el tram de temps amb més desequilibri	54
Figura 6.19 Potències actives de cada fase vistes des de la xarxa i la càrrega	54
Figura 6.20 Potència reactiva de la fase a vista des de la xarxa i la càrrega.....	55

Figura 6.21 Potència reactiva de la fase b vista des de la xarxa i la càrrega.....	55
Figura 6.22 Potència reactiva de la fase c vista des de la xarxa i la càrrega.....	56
Figura 6.23 f.d.p. de la fase a vista des de la xarxa i la càrrega.....	57
Figura 6.24 f.d.p. de la fase b vista des de la xarxa i la càrrega.....	57
Figura 6.25 f.d.p. de la fase c vista des de la xarxa i la càrrega	57
Figura 6.26 f.d.p. de les tres fases vistes des de la xarxa	58
Figura 7.1 Gràfic de Gantt sobre la planificació de les fases del treball.....	60
Figura 13.1 Transformació d'un sistema trifàsic (esquerra) a Clarke (mig) i a Park (dreta) [28]	71
Figura 13.2 Disseny de l'eina implementada amb el SIMULINK	72
Figura 13.3 Disseny de la xarxa	73
Figura 13.4 Disseny de com es genera el corrent per simular una càrrega a partir de les potències actives i reactives per una fase	75
Figura 13.5 Disseny del bloc de mesuradors i indicadors	77
Figura 13.6 Disseny de l'interior del bloc de potència i f.d.p. d'una fase.....	78
Figura 13.7 Disseny del prototip mitgador de problemes relacionats amb la qualitat del subministrament.....	80
Figura 13.8 PLL per extreure la fase de les tensions de la xarxa	81
Figura 13.9 Teorema de les components directes aplicades als corrents de la xarxa.....	82
Figura 13.10 Bloc de desacoblament en seqüència directe	83
Figura 13.11 Transformacions inverses de Park i Clarke i unió de les seqüències directe i inversa per a l'obtenció de corrents que s'injectaran a la xarxa.....	84

Índex de taules

Taula 3.1 Despesa a pagar en funció de la reducció del factor de potència i energia consumida [15]	20
Taula 3.2 Disminució de pèrdues amb la millora del factor de potència	24
Taula 4.1 Variables controlables del bloc de la xarxa	28
Taula 4.2 Variables controlables del bloc de càrrega	29
Taula 4.3 Mesures del bloc mesuradors i indicadors	32
Taula 5.1 Casos d'estudi que s'analitzen	39
Taula 6.1 Mitjanes quadràtiques dels corrents de la xarxa i la mitjana aritmètica en el màxim desequilibri	40
Taula 6.2 Potència reactiva màxima, mínima i mitjana per cada fase	42
Taula 6.3 Recull dels temps on el factor de potència es redueix i càlcul de la seva despesa	42
Taula 6.4 Recull de les despeses a pagar per la reducció del f.d.p. per fases i totals	42
Taula 6.5 Mitjanes quadràtiques i mitjana aritmètica dels corrents equilibrats en el tram amb més desequilibri	44
Taula 6.6 Recull dels desequilibris sense i amb equip i la reducció de desequilibris obtinguda	44
Taula 6.7 Recull de potències reactives les màximes, mínimes i mitjanes de cada fase vistes des de la xarxa o la càrrega amb càlcul de la reducció acomplida per a la potència mitjana	47
Taula 6.8 Càlcul de la reducció de la potència reactiva màxima	47
Taula 6.9 Recull dels temps on el factor de potència es redueix i càlcul de la seva despesa	48
Taula 6.10 Comparació de les despeses a pagar per consum de potència reactiva amb o sense prototip	49
Taula 6.11 Mitjanes quadràtiques dels corrents de la xarxa i la mitjana aritmètica en el màxim desequilibri	50

Taula 6.12 Potència reactiva màxima, mínima i mitjana de cada fase de la xarxa en un dia	51
Taula 6.13 Recull dels temps on el factor de potència es redueix i càlcul de la seva despesa	52
Taula 6.14 Recull de les despeses a pagar per la reducció del f.d.p. per fases i totals	52
Taula 6.15 Mitjanes quadràtiques i mitjana aritmètica dels corrents equilibrats en el tram amb més desequilibri	54
Taula 6.16 Recull dels desequilibris sense i amb equip i la reducció de desequilibris obtinguda	54
Taula 6.17 Recull de potències reactives les màximes, mínimes i mitjanes de cada fase vistes des de la xarxa o la càrrega amb càlcul de la reducció acomplida per a la potència mitjana.....	56
Taula 6.18 Càlcul de la reducció de la potència reactiva màxima	56
Taula 6.19 Comparació de les despeses a pagar per consum de potència reactiva amb o sense prototip.....	58
Taula 8.1 Cost dels recursos humans a partir de la persona que ha realitzat l'activitat i les hores que hi ha dedicat	61
Taula 8.2 Cost dels recursos materials a partir del nombre de les unitats emprades i el seu cost per unitat.....	61
Taula 8.3 Cost dels recursos energètics a partir del consum energètic i el cost d'aquest consum	62
Taula 8.4 Cost final del projecte per cada recurs utilitzat i amb l'IVA inclòs	62
Taula 9.1 Emissions de CO2 emeses a partir de l'energia consumida.....	63
Taula 13.1 Esquema del teorema de les components simètriques [25]	69

1. Glossari

EXCEL: el nom complet, Microsoft Excel, és un programa de full de càlculs de l'empresa d'informàtica de Microsoft

f.d.p.: el factor de potència (f.d.p.) és la relació entre la potència aparent i la potència activa. Pot prendre valors entre -1 i 1 i és una variable adimensional (és a dir que no té unitats). Quan el f.d.p. és igual a 1 o a -1 significa que la potència aparent és igual a tota la potència activa, en canvi, quan és 0 tota la potència aparent és reactiva.

I_x : La i majúscula és el símbol per caracteritzar les intensitats d'un circuit elèctric. El subíndex x és per senyalitzar la fase a que pertany.

MATLAB: És un software que consisteix en un entorn de computació numèrica i també un llenguatge de computació creat per la companyia de Mathworks.

P_x : La p majúscula és el símbol que rep la potència activa d'un circuit elèctric trifàsic. El subíndex x és per senyalitzar la fase a que pertany.

PLL: de l'anglès *Phase-Locked Loop* (PLL), que en català es coneix com un llaç de seguiment de fase. És un circuit capaç de generar una oscil·lació la qual la fase que té es manté acotada a un senyal d'entrada, comptant per a això amb una realimentació que compara la fase de les dues senyals i actua modificant la freqüència de l'oscil·lació generada.

Q_x : La q majúscula és el símbol que rep la potència reactiva d'un circuit elèctric trifàsic. El subíndex x és per senyalitzar la fase a que pertany.

S_x : La s majúscula és el símbol que rep la potència aparent o real d'un circuit elèctric trifàsic. El subíndex x és per senyalitzar la fase a que pertany.

SAI o UPS: sistema d'alimentació ininterrompuda; en anglès UPS, *Uninterruptible Power Supply*, és un aparell elèctric que subministra energia elèctrica quan la font primària d'electricitat falla.

SI: el sistema internacional d'unitats és el sistema d'unitats més utilitzat al món.

SIMULINK: és un entorn interactiu per al modelat, anàlisi i simulació de gran varietat de sistemes dinàmics que es troba integrat al software de MATLAB.

V_x : La v majúscula és el símbol que rep la tensió simple d'un circuit elèctric trifàsic. El subíndex x és per senyalitzar la fase a que pertany.

2. INTRODUCCIÓ

El següent treball a introduir ve relacionat estretament amb el món de les xarxes elèctriques que són els sistemes que s'encarreguen de la generació, transport i subministrament de l'energia elèctrica. Més concretament es el treball es centra en les zones de subministrament elèctric i la qualitat de la provisió de l'energia que entreguen.

Aquests sistemes es caracteritzen per la seva gran envergadura i que cada cop estan formats i hi actuen més elements. Aquestes característiques determinen les xarxes elèctriques com a sistemes que són fràgils a l'hora de transmetre l'energia sense que hi apareguin problemes en el subministrament.

2.1. Objectiu del projecte

L'objectiu principal del projecte és realitzar el disseny d'una eina que permeti fer simulacions amb la finalitat d'estudiar xarxes elèctriques. A més a més , el què es vol d'aquesta eina és que permeti la implementació de possibles solucions als problemes de subministrament per a poder realitzar anàlisis comparatius de les mateixes xarxes elèctriques quan tenen implementades aquestes solucions i quan no les hi tenen i així, estudiar l'efectivitat d'aquestes solucions.

La idea d'aquesta eina és desenvolupar-la mitjançant un programa informàtic i que acabi esdevenint en una xarxa elèctrica genèrica per així poder modelar els seus paràmetres característics per adaptar-se a una xarxa elèctrica concreta.

2.2. Abast del projecte

L'abast del projecte va des de la cerca i la síntesis de la informació necessària per elaborar la part pràctica, passant per la fase de disseny de l'eina de simulació fins arribar als resultats que s'obtenen d'aquesta.

Hi ha dos límits importants que s'ha hagut d'adaptar el projecte a causa del marge de temps que es tenia per realitzar-lo: el primer és que de tota la xarxa de distribució es centra en la part de subministrament per acotar el sistema. El segon límit és que les xarxes d'estudi tenen una freqüència que és sempre ideal i constant al valor nominal de 50 Hz, això implica que tots els problemes causats per les variacions de tensió no s'estudien.

3. ESTAT DE L'ART

Actualment l'energia elèctrica és molt necessària, es podria dir pràcticament vital, per a les societats desenvolupades ja sigui perquè facilita les feines amb màquines que consumeixen aquesta energia o inclús per l'ús que se li dona amb moltes activitats d'oci. És per això que és molt important assegurar el seu transport i la seva qualitat i aquests objectius molts cops no són quelcom trivial. L'estat de l'art s'estructura amb l'explicació del sistema de generació i consum de l'energia, quins problemes pot presentar i quins mètodes es poden recórrer per mitigar-los.

3.1. Xarxa elèctrica

Una xarxa elèctrica és un sistema format per un conjunt d'elements que busquen assegurar la connexió de l'energia elèctrica des de que és generada fins al seu consum amb la màxima velocitat, eficiència i amb el mínim de pèrdues energètiques possibles [1].

Al ser un sistema de grans proporcions, es sol dividir en subsistemes en funció de si l'electricitat és generada, transportada o distribuïda per al seu consum. Un esquema de com i de què està formada una xarxa elèctrica podria ser el següent:

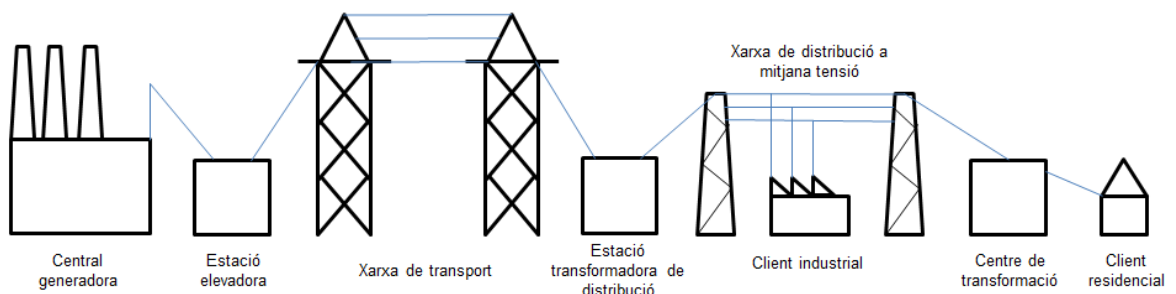


Figura 3.1 Esquema general d'una xarxa elèctrica [font pròpia]

Seguint la divisió habitual, es poden diferenciar tres subsistemes que conformen la Figura 3.1:

- Generació d'electricitat: Formada per una central generadora. Es diferencien tres centrals generadores en funció de l'obtenció de l'electricitat [2]: renovables que obtenen a partir d'energies renovables com són l'eòlica, la solar o la hidràulica, les centrals tèrmiques i les centrals nuclears.
- Transport d'electricitat: Es coneix també com la zona d'alta tensió, i com els noms suggereixen, l'electricitat és elevada a altes tensions i és transportada en llargues

distàncies. El motiu pel qual s'aplica aquest canvi en la tensió és per reduir les pèrdues produïdes per l'efecte Joule [3], que diu que les pèrdues de calor estan directament relacionades amb la intensitat. Per tant, si s'augmenta la tensió, segons la llei d'Ohm baixarà la intensitat i amb ella baixaran també les pèrdues de calor que tindria la línia.

- Distribució d'electricitat: També coneguda com a zona de mitja i baixa tensió dins la xarxa elèctrica. Amb l'ajuda d'un centre de transformació es pot rebaixar l'electricitat fins a tensions mitjanes de 3-30kV i en aquí ja pot ser distribuïdes en zones industrials que requereixen d'aquests nivells de tensió. Més endavant torna haver-hi un centre de transformació es baixa l'electricitat als nivells demanats per al consum domèstic.

Així doncs les xarxes elèctriques generen, transporten i distribueixen corrents elèctrics. En les xarxes elèctriques més habituals es transporten corrents alterns que són els que els electrons es mouen en ambdós sentits de forma periòdica, canviant de signe cada cert temps [4], la forma matemàtica temporal d'una intensitat alterna segueix una forma sinusoidal que canvia amb la pulsació i el temps :

Una característica molt important sobre les xarxes és que, majoritàriament, es transporten els corrents elèctrics de forma trifàsica. Un sistema trifàsic és un tipus de sistema polifàsic on es tenen tres fases o circuits monofàsics desfasats entre ells. Si les tres fases tenen les mateixes amplituds i el desfasament entre elles és exactament de 120° , es diu que el sistema trifàsic està equilibrat [5]. En canvi quan el sistema té diferents amplituds o diferents angles entre fases es diu que està desequilibrat, a la pràctica tots els sistemes trifàsics estan desequilibrats ja que els components de les xarxes no són ideals i sempre poden haver-hi errors que puguin causar desequilibris; tot i així sempre es busca tenir-lo al màxim d'equilibrat possible perquè no causi sobreescalfament als equips connectats al sistema elèctric.

En els sistemes trifàsics es poden tenir tres cables, un cable per cada fase transportada, o quatre cables. Aquest cable afegit es denomina com el cable neutre i apareix quan es fan coincidir les tres fases en un punt, aquesta connexió és coneguda com la connexió d'estrella trifàsica.

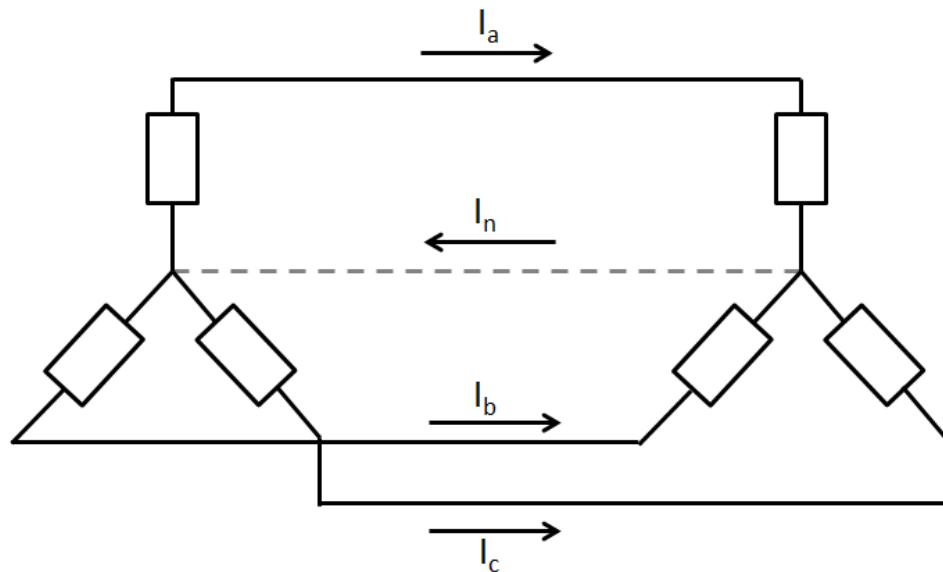


Figura 3.2 Connexió trifàsica amb neutre [font pròpia]

El neutre transporta la suma vectorial dels corrents de les fases de línia. Això implica que si el sistema es troba completament equilibrat el neutre no transporta cap corrent, i en canvi quan el sistema està desequilibrat sí. La funció principal del neutre és assegurar una tensió aproximadament constant per a cada fase de la càrrega receptora, aconseguint a més a més que qualsevol variació de la impedància d'una de les fases no afecti de forma significativa a les altres dues restants. Si bé és cert que en un sistema completament equilibrat el neutre faria un servei pràcticament nul, a la realitat és una bona eina per combatre els diferents desequilibris que puguin presentar les línies elèctriques [6].

Hi ha varis avantatges sobre per què s'utilitzen les xarxes elèctriques trifàsiques enlloc de les monofàsiques:

- El més important és que la potència transportada total no recau en un cable sinó que queda repartida en tres fases diferents. Gràcies aquest fet les seccions dels cables són inferiors en comparació amb un monofàsic i, per tant, es transporta la mateixa quantitat de potència amb l'avantatge que s'estalvia material.
- Els motors també es veuen beneficiats de les xarxes trifàsiques. El corrent altern passa per un moment de màxima intensitat i per un moment en el qual la intensitat és zero, i per tant, la força electromecànica que provoca també ho és. Si s'utilitzessin motors de corrent altern monofàsic, hi hauria una força cíclica sobre l'eix del motor, que provocaria fatiga en l'eix i un escurçament de la seva vida útil. En tenir un sistema trifàsic la força electromecànica no és mai nul·la, perquè sempre hi ha almenys dues de les fases exercint força mecànica, les forces cícliques són menors, i, per tant, els efectes de la fatiga també seran menors i la vida útil més llarga [7].

- El fet de poder tenir tres línies i un neutre permet obtenir dues tensions diferents, la tensió simple (o de fase) i la tensió composta (o de línia), això permet al consumidor escollir una tensió o altra en funció de la seva necessitat pel mateix transport de la xarxa. La relació entre aquestes dues tensions és d'arrel de tres, per tant en una mateixa línia es pot connectar una càrrega que consumís 230 volts amb la tensió simple o bé connectar-la a la tensió composta i obtenir 400 volts, que són les tensions normalitzades però podrien ser d'altres.

La xarxa elèctrica es caracteritza també per un factor molt limitant: l'electricitat no pot ser emmagatzemada. Aquest sistema, doncs, es veu obligat a emprar un control que constantment intenta igualar la potència produïda en els generadors d'electricitat amb la demanda que es té un lloc a una tensió i una freqüència especificada [8].

La potència elèctrica és la quantitat d'energia que és transmesa per unitat de temps, de fet, la unitat de la potència en Sistema Internacional (SI) és el watt que el seu equivalent és el J/s. La fórmula de la potència per a un circuit continu és el producte directe de la tensió i el corrent elèctric.

En els corrents alterns la potència total, o aparent (S), es calcula igual que la potència d'un corrent continu, però, apareix un nou concepte que és el desfasament entre la tensió i la intensitat. Això permet dividir la potència aparent en dues components vectorials conegudes com a potència activa (P) i potència reactiva (Q). Així doncs la potència aparent també es pot definir com a la suma vectorial de la potència activa i reactiva. Les unitats del Sistema Internacional (SI) de la potència aparent són els voltampères (VA).

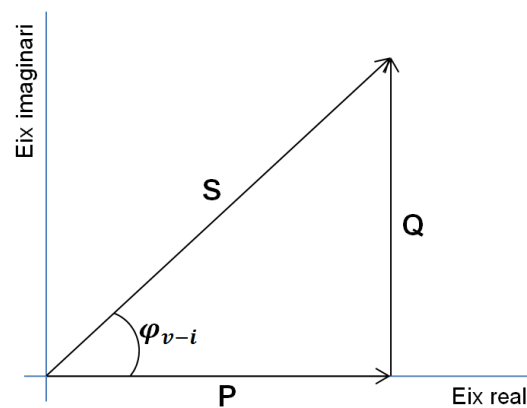


Figura 3.3 Representació vectorial de les potències d'un sistema trifàsic

Es defineix com a potència activa aquella que és servible per convertir-la tota en forma de treball. És per tant la potència útil en els circuits alterns i és per això que manté les mateixes unitats del SI watts (W) que el corrent continu.

La potència reactiva és consumida pels circuits alterns quan aquests posseeixen elements que generen camps magnètics quan es troben en funcionament i causen un desfasament entre les ones de tensió amb les ones de corrent elèctric. Aquests elements poden ser capacitius, com són els condensadors, o elements inductius, com són les bobines. Aquest tipus de potència s'intenta reduir tant com es pot ja que no és útil per transformar-la en forma de treball i a més a més pot perjudicar la transmissió de l'energia a través de les línies elèctriques. Al tenir un caràcter diferent de la potència activa, el Sistema Internacional (SI) li atribueix unes altres unitats que tenen el nom de voltamperes reactius (var).

El Factor de Potència (f.d.p.) és la relació entre les potències Activa (P) i Aparent (S). Si l'ona de corrent altern és perfectament sinusoidal, f.d.p. i $\cos(\varphi)$ coincideixen. Com s'ha especificat en l'abast del projecte, no es contempla que hi hagi harmònics en la xarxa que es simula i per tant en aquest cas es pot afirmar que el factor de potència és equivalent al $\cos(\varphi)$.

Si l'ona no fos perfecta, la potència aparent no estaria únicament composta per potència activa i potència reactiva, sinó que apareixeria una tercera component suma de totes les potències que genera la distorsió. A aquesta component de distorsió se li atribueix la lletra D [9]. Gràficament es veuria així:

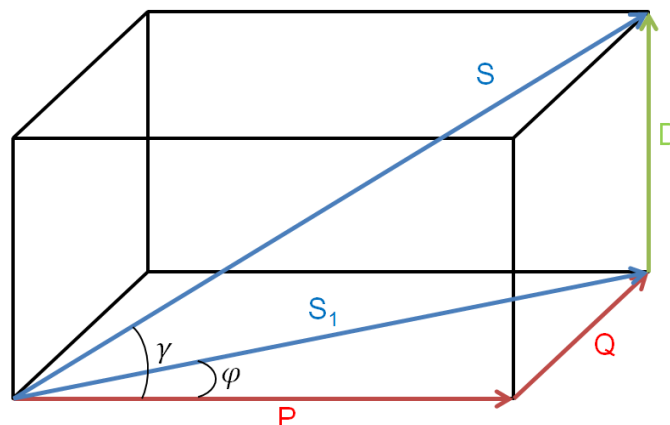


Figura 3.4 Representació vectorial de les potències d'un sistema trifàsic amb distorsió

En el cas de la Figura 3.4 el factor de potència no ve donat per la variable φ sinó que la variable que relaciona la potència activa amb la potència aparent total és γ degut a la distorsió.

3.2. Sistema de distribució en baixa tensió

Com bé s'ha descrit, les zones de baixa tensió formen part de la distribució de les xarxes de tensió, i com a components d'aquest gran sistema, es caracteritzen pel que s'ha explicat en el punt 3.1.

A Espanya la llei que regula les zones de baixa tensió de les xarxes elèctriques és el Real Decreto 842/2002, en ella engloba les zones de baixa tensió totes aquelles instal·lacions que distribueixin l'energia elèctrica, que consumeixin i generadors d'electricitat per a consum propi que en circuits alterns no superin els 1000 V nominals i en corrents continus no superin els 1500 V [10].

El bon funcionament de les zones de baixa tensió no és senzill, es tracten de sistemes de dimensions gegants format per aparells no ideals que generen errors o problemes que provoquen una pèrdua de la qualitat de la xarxa.

Els problemes es poden classificar en funció de diferents criteris uns exemples podrien ser: el temps (si el problema és transitori o estacionari), el grau d'afectació (si afecta només a una fase o en tot el trifàsic) o bé l'origen del problema (si sorgeix per culpa de la càrrega, durant el transport o per culpa d'un element generador).

3.2.1. Sistema trifàsic desequilibrat

És el problema més freqüent i en certa manera més genèric ja que està causat per altres problemes més concrets. El sistema es diu que està desequilibrat quan l'amplitud de les intensitats o tensions no és la mateixa per les tres fases, o bé la diferència de fase entre les fases del sistema tampoc són iguals. Es pot classificar com un problema que succeeix a nivell global, és a dir que afecta tot el trifàsic del sistema.

El principal motiu de perquè un sistema es trobi desequilibrat és que la càrrega que està connectada a les tres fases és desequilibrada. Això provoca que per un grup de tensions equilibrades generin un grup de corrents desequilibrades entre elles.

Una altra raó per la qual la xarxa estigui desequilibrada pot venir donada per una anomalia en el sistema de tensions d'alimentació degut alguna averia com podria ser la connexió d'alguna o varies fases a terra o un curtcircuit entre les fases. En aquest cas el desequilibri seria de les tensions i com a conseqüència es desequilibrarien les intensitats del sistema també.

També pot passar que les línies de transport tinguin propietats diferents fet que faci que les impedàncies siguin diferents entre elles i desequilibri el sistema de corrents. En la següent

imatge queden recollits tot els motius pel qual un sistema es pot desequilibrar esquemàticament [11]:

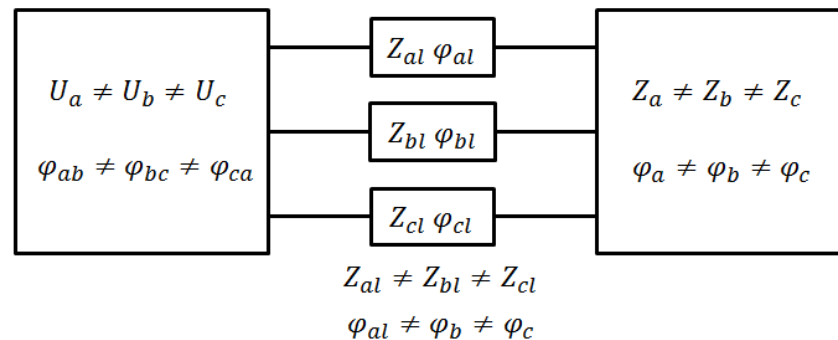


Figura 3.5 Esquema de les possibles causes d'un desequilibri en un sistema trifàsic

Els sistemes elèctrics trifàsics desequilibrats tenen efectes negatius per a la xarxa com els dispositius que en formen part. Els més afectats per aquests són els motors elèctrics. Aquesta última afirmació es pot explicar gràcies al teorema de Fortescue (explicat àmpliament a l'annex 13.1) que a grans trets diu que un sistema trifàsic desequilibrat és la suma de tres sistemes trifàsics equilibrats: un de seqüència positiva (gira amb el mateix sentit que el sistema desequilibrat), un de seqüència negativa (gira amb el sentit oposat que el sistema desequilibrat) i un sistema de seqüència zero (que consisteixen en tres fasors b un desplaçament de fase zero respecte uns dels altres). El fet de que aparegui la component de seqüència negativa, que gira oposadament al sistema, genera en el motor un parell resistent que contribueix en l'aparició d'escalfaments i sobreesforços que poden gastar peces mecàniques com són els coixinets.

Les pèrdues del motor elèctric augmenten exponencialment en funció dels desequilibris de les tensió. La temperatura del motor també augmenta en funció del desequilibri, però aquesta amb un pendent menys pronunciat que el primer [12].

3.2.2. Potència reactiva

La potència reactiva també es considera un problema en els sistemes de distribució. Pot presentar-se de forma estacionària al llarg del temps o inclús pot aparèixer de forma transitòria degut a un possible pic de demanda.

Com s'ha explicat en el punt 3.1 apareix degut el desfasament de les ones de tensió amb les ones de intensitat. Aquest desfasament és causat per aparells que contenen elements capacitius que endarrereixen el voltatge 90° respecte el corrent elèctric (en aquest cas es diu que la potència reactiva té origen capatiu) com bé són: bateries, memòries RAM, filtres electrònics, fonts d'alimentació, oscil·ladors, motors monofàsics de fase partida entre

d'altres. O també pot ser causat per aparells que contenen elements inductius que endarrereixen el corrent elèctric 90° respecte el voltatge (en aquest cas es diu que la potència reactiva té origen inductiu) com bé són: motors elèctrics o generadors, transformadors elèctrics, relés, electrovàlvules [13].

La potència reactiva provoca efectes negatius per al sistema de distribució de la xarxa elèctrica però també per la xarxa elèctrica en general. Pot causar [14]:

- Increment de pèrdues d'energia degut a l'efecte Joule $P_{pèrdues} = R \cdot I^2$
- Danys a equips per efecte de sobretensió i sobrecorrent.
- Escalfament de motors elèctrics.
- Oscil·lacions mecàniques en motors i generadors.
- Reducció de la vida útil d'equips.
- Errors de funcionament en equipament electrònic.

El fet de que pugui ser perjudicial per a la xarxa i per al mateix consumidor hi ha lleis a nivell espanyol que regulen el cost de consumir excessiva energia reactiva. Segons la "Orden ITC /3519/2009" el consumidor està castigat a pagar de més per consumir potència reactiva si el factor de potència es redueix als següents nivells [15]:

$\cos(\varphi)$	€/kvarh
$0,95 > \cos(\varphi) > 0,80$	0,041554
$0,80 > \cos(\varphi)$	0,062332

Taula 3.1 Despesa a pagar en funció de la reducció del factor de potència i energia consumida [15]

3.2.3. Pertorbacions elèctriques

S'entén com a pertorbacions elèctriques totes aquelles circumstàncies que puguin allunyar les tensions o bé els corrents de la seva forma d'ona sinusoïdal, d'amplitud o magnitud.

Les causes de les pertorbacions es classifiquen segons el seu origen, i n'hi ha de quatre tipus diferents [16]:

- Aleatòries: Normalment causades per fenòmens atmosfèrics (raigs, gel), elements de la naturalesa (branques d'arbres, ocells) o accidents provocats per personal d'obres.
- Pròpies de la gestió del sistema elèctric. Principalment a causa de la commutació de dues línies
- Atribuïdes a la pròpia instal·lació de l'usuari. Poden ser causades per connexions brusques de càrregues potents, curtcircuits o seccions de cables inadequades.

- Causades per les instal·lacions dels usuaris veïns.

Unes de les pertorbacions més rellevants són les següents:

Impulsos transitoris

Com el nom transitori suggereix són esdeveniments que alteren la senyal de la xarxa de forma passatgera. Els transitoris impulsius es generen de forma sobtada i formen una cresta sobredimensionada de tensió i/o de corrent en direcció positiva o negativa. Una ona que hi està sotmesa podria tenir la següent forma:

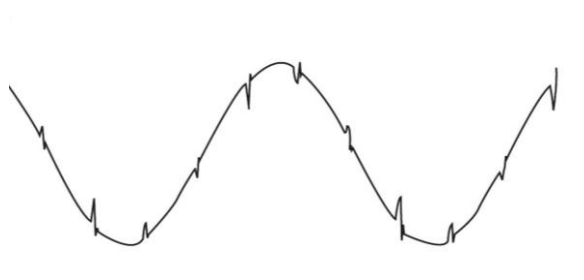


Figura 3.6 Representació d'una ona afectada per impulsos transitoris [17]

Interrupcions

Una interrupció consisteix en la pèrdua total de tensió o de corrent. Segons la duració d'aquesta, es pot classificar coma a instantània (0,5 a 30 cicles), momentània (30 cicles a 2 segons), temporal (2 segons a 2 minuts) o sostinguda (major de 2 minuts).

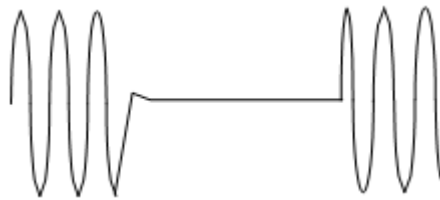


Figura 3.7 Representació d'una interrupció [17]

Baixada de tensió i subtensió

La reducció de tensió de corrent altern a una freqüència donada es coneix com a baixada de tensió. Quan la baixada de tensió acaben sent de llarga duració es diu que es tracta d'una subtensió pot originar diferents problemes com ja siguin un sobreescalfament de motors o falles de càrregues no lineals com són les fonts d'alimentació dels ordinadors.

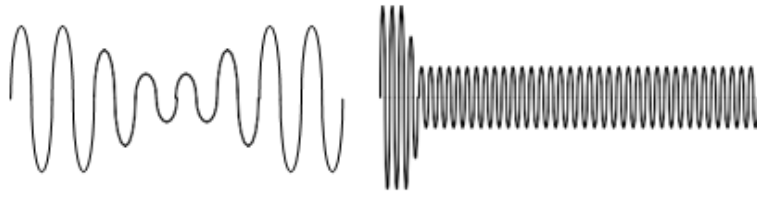


Figura 3.8 Representació d'una baixada de tensió (esquerra) i una subtensió (dreta) [17]

Augment de tensió i sobretensió

Al revés de la baixada de tensió, l'augment de tensió és la pujada de corrent altern que quan és prolongada es defineix com a sobretensió. Davant d'aquest problema, la xarxa de distribució pot reduir els nivells de tensió intencionadament



Figura 3.9 Representació d'un augment de tensió (esquerra) i d'una sobretensió (dreta) [17]

Variacions de freqüència

La variació de freqüència implica un canvi de velocitat en la permutació de l'ona transmesa, ja sigui accelerant-la o frenant-la. No és un error gaire comú en la xarxa elèctrica, pot aparèixer en llocs que s'usen generadors de reserva i en infraestructures on hi ha una pobra alimentació.

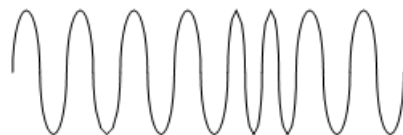


Figura 3.10 Representació de variació de freqüència [17]

Els equips informàtics solen ser tolerants, i generalment no es veuen afectats per corriments menors en la freqüència del generador local. Tot i així les variacions de freqüència poden aconseguir que un motor funcioni més ràpid o més lent fent que el motor funcioni ineficaçment, que treballi a més calor i com a conseqüència es degradi més fàcilment.

3.3. Mitigació d'errors

Amb la presentació dels problemes explicats de la xarxa, s'ha hagut de buscar solucions per intentar eliminar-los o si més no, reduir-los al màxim.

Pel que fa als sistemes trifàsics desequilibrats es tenen diferents mètodes per intentar evitar els efectes perjudicials. La primera solució consisteix en reorganitzar o redistribuir les càrregues de manera que el sistema estigui més equilibrat. Això s'aconsegueix mitjançant interruptors i algorismes que controlen aquests. Una altra forma de reduir els desequilibris de la xarxa seria optimitzant aquests algorismes alterant els seus paràmetres de funcionament per a convertir-los en més efectius.

Un altre tipus de tècnica mitigadora és l'ús de transformadors especials, com bé és el transformador de Steinmetz. que consisteix en un transformador trifàsic amb una càrrega addicional per equilibrar a l'energia. Aquesta càrrega està formada per un condensador i per un element inductor amb una càrrega nominal proporcional a la càrrega monofàsica que està connectada a la xarxa. Quan el valor nominal de la potència reactiva de l'inductor i del condensador igualen el valor nominal de la potència reactiva de la càrrega, la xarxa elèctrica trifàsica veu una càrrega equilibrada. La potència nominal trifàsica del transformador iguala la potència activa de la càrrega monofàsica. Aquest mètode però té un element restrictiu i aquest és que la xarxa només veu la càrrega completament equilibrada quan les potències del transformador i de la càrrega s'igualen, això vol dir que si la càrrega varia l'equilibratge deixa de ser del tot efectiu [18].

Existeixen diferents mètodes de compensació del factor de potència utilitzats en les instal·lacions elèctriques. Els més habituals en les xarxes de baixa tensió són les instal·lacions de condensadors o bobines de potència en paral·lel amb la càrrega capacitiva o inductiva a compensar. Són més utilitzades les instal·lacions de condensadors atès a que normalment les xarxes elèctriques tenen càrregues resistives i inductives, com són els motors, els transformadors o els fluorescents que estan formats per bobines. Per reduir la potència reactiva també es fan servir màquines sincròniques de gran potència que treballen com a generadors de potència reactiva, però aquest tipus de compensació no és molt utilitzada, s'utilitza només en el cas de que hi hagi en la instal·lació motors sincrònics de gran potència que funcionin per llargs períodes de temps..

Reduint la potència reactiva es redueixen les pèrdues d'energia que gràcies a la fórmula de l'efecte Joule on es substitueix la intensitat en funció de la potència activa s'obté la següent relació:

$$\frac{Pèrdues_{inicials}}{Pèrdues_{finals}} = \left(\frac{\cos(\varphi_{inicial})}{\cos(\varphi_{final})} \right)^2 \quad (1)$$

En la següent taula queden il·lustrades les reduccions de pèrdues d'energia en percentatge en una xarxa que se li compensa la potència reactiva [19].

Disminució de pèrdues per efecte Joule [%]				
$\cos(\varphi_{final})$	$\cos(\varphi_{inicial})$			
	0,85	0,90	0,95	1,00
0,60	50,17	55,56	60,11	64,00
0,65	41,52	47,84	53,19	57,75
0,70	32,18	39,51	45,71	51,00
0,75	22,15	30,56	37,67	43,75
0,80	11,42	20,99	29,09	36,00
0,85	-	10,80	19,94	27,75
0,90	-	-	10,25	19,00
0,95	-	-	-	9,75

Taula 3.2 Disminució de pèrdues amb la millora del factor de potència

Per a les pertorbacions elèctriques també hi ha metodologies per reduir-les. Una d'elles és la línia dedicada que consisteix en un conjunt de conductors, com poden ser les tres fases i el neutre, que alimenten únicament un equip i que a més a més s'assegura que aquesta connexió es trobi al màxim de lluny possible de qualsevol estació que pugui alterar la línia com pot ser una estació transformadora. Amb aquest mètode s'eviten les caigudes de tensió distorsionades o els augments de tensió transitoris.

Les solucions explicades fins ara són les més senzilles o tradicionals i que s'utilitzen pràcticament des del mateix moment en que van aparèixer les xarxes de distribució elèctriques. Tot i així, com que no són del tot efectives o suficients no s'ha deixat de treballar per trobar solucions noves fins que s'ha arribat a desenvolupar una nova branca en la ciència de l'electrònica que és coneguda com electrònica de potència

3.3.1. Electrònica de potència

L'electrònica de potència neix a partir de la necessitat de controlar sistemes que contenen una gran energia. Un molt bon exemple d'aquests sistemes és la xarxa elèctrica que com s'ha pogut llegir en apartats anteriors d'aquesta memòria, el seu subministrament d'energia està lluny de ser ideal degut a les seves desproporcionades dimensions, la seva alta demanda d'usuaris amb necessitats desiguals, així com també màquines que en formen part que poden generar errors.

Es pot definir com l'aplicació de l'electrònica al control i la conversió de l'energia elèctrica i es distingeix de la resta de l'electrònica per el nivell elevat de tensió i corrent elèctric que treballen els dispositius.

Aquesta forma de control és relativament moderna, de fet les dues grans revolucions de l'electrònica de potència es donen a finals de la dècada de 1940 i a finals de 1957 amb la invenció del transistor de silici i la invenció del tiristor comercial respectivament. Des d'aleshores s'han anat inventant dispositius que tenen com a objectiu millorar l'eficiència i controlar l'ús de l'energia elèctrica en diferent aplicacions fins a l'actualitat

Per a l'aplicació de control, l'electrònica de potència es basa en l'ús de dispositius semiconductors de potència. Els més transcendents o de més interès són:

- Díode: és un dispositiu electrònic no lineal i polaritzat format per dos elèctrodes actius. Només deixa circular el corrent elèctric en un únic sentit i el bloqueja en el sentit contrari restringint el moviment dels electrons.
- Transistor: s'utilitza com a amplificador, reductor, oscil·lador o com a commutador. Hi ha de molts tipus segons la seva estructura, material del que estan compostats o la polaritat. Els transistors utilitzats en l'electrònica de potència són els transistors bipolars de porta aïllada coneguts també per les sigles IGBTs (de l'anglès *Insulated Gate Bipolar Transistor*). Aquests transistors accepten corrents i voltatges elevats, tenen una velocitat de commutació mitja comparats amb altres transistors i un preu elevat.
- Tiristor: utilitza la realimentació interna per produir una commutació. Són dispositius unidireccionals (SCR) o bidireccionals (Triac) o (DIAC).

L'aparició de l'electrònica de potència i les noves aplicacions que donen els seus elements permeten fer un canvi radical dels controls de les xarxes elèctriques i donen més eines per reduir-ne els seus errors. Però no tot és positiu, el fet d'introduir nous elements a la xarxa implica fer més gran el sistema que es vol controlar i que això paradoxalment el faci més difícil de controlar o que es pugui arribar a descontrolar amb més facilitat. A més a més, l'electrònica de potència tampoc es caracteritza pel baix cost dels seus elements

Amb l'electrònica de potència es pot equilibrar les xarxes elèctriques mitjançant circuits electrònics de potència especials d'acció ràpida, com són els condensadors var estàtics. Aquests es comporten com si fossin impedàncies complementàries que canvien ràpidament i compensen els canvis en impedància de les càrregues en cada fase. També són capaços de compensar la potència reactiva no desitjada; no obstant això, es tracta de dispositius cars i només s'utilitzen per a grans càrregues (per exemple, forns d'arc) i quan són insuficients les altres solucions.

Una eina que s'utilitza de l'electrònica de potència per evitar algunes de les pertorbacions elèctriques és el sistema d'alimentació ininterrompuda, coneguda per les seves sigles SAI o també de les sigles d'anglès UPS (*Uninterruptible Power Supply*). Són sistemes que permeten alimentar a la càrrega que hi té connectada quan la font de subministrament primària falla a partir d'unes bateries o condensadors. Són realment útils amb problemes com són les interrupcions, subtensions, sobretensions o variacions en les freqüències. Tanmateix són realment sensibles per els impulsos transitoris.

4. EINA PER A LA MODELITZACIÓ, MITIGACIÓ I QUANTIFICACIÓ DELS PROBLEMES

Aquest apartat té com a objectiu descriure l'eina que es dissenya i s'utilitza en la part pràctica de la memòria, així com també assenyalar les parts de què es compona i per a què serveixen. L'apartat està dividit en tres subapartats que expliquen el disseny conceptual de l'eina, el prototip que s'empra per reduir els problemes de distribució i la quantificació dels problemes que sorgeixen.

L'eina a descriure consisteix en la implementació d'un sistema digital per elaborar simulacions en ella. Amb aquesta implementació, el que es busca és el disseny d'una eina que permeti poder demostrar la funcionalitat de mètodes de mitigació d'errors que es produeixen a la xarxa de subministrament. Per realitzar la simulació es fa servir l'ús del software informàtic de MATLAB. Més concretament, dins del software es fa servir l'entorn de programació visual que té el nom de SIMULINK.

4.1. Disseny conceptual de l'eina

L'eina completament elaborada i dissenyada segueix el següent esquema conceptual:

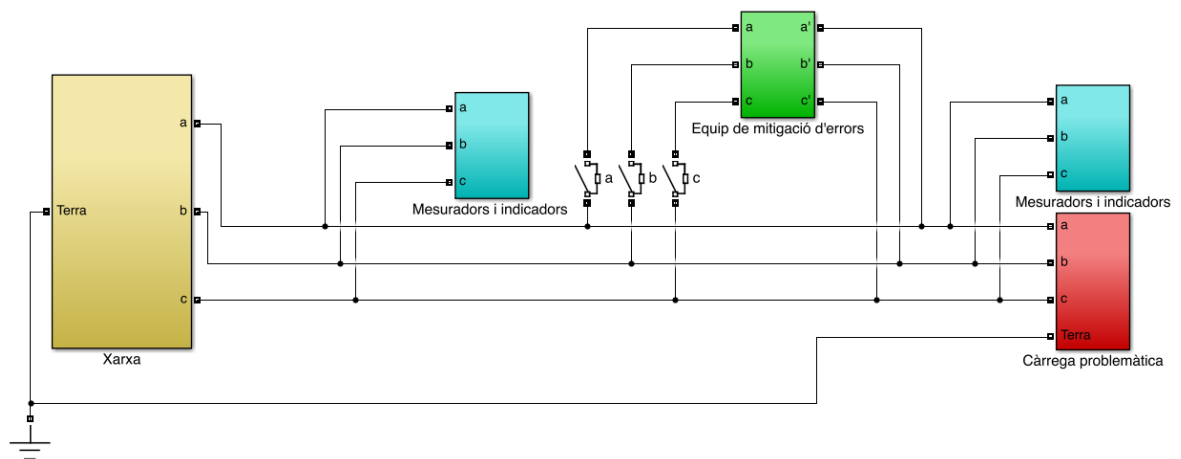


Figura 4.1 Esquema conceptual del disseny de l'eina per realitzar simulacions

El sistema elaborat consisteix en una xarxa de distribució de baixa tensió genèrica en que es poden alterar els seus elements característics per ajustar al cas d'estudi que es vulgui. Per aconseguir-ho es dissenya un bloc que generi la xarxa elèctrica (el bloc de color groc en la Figura 4.1), aquest marca les condicions inicials de l'estudi generant un sistema trifàsic de tensions, amb una connexió d'estrella, que són transportades fins a les càrregues on el sistema s'acaba de definir adaptant-se amb les característiques que aquestes requereixen.

Les dades que es poden manipular del bloc per inicialitzar-lo són les amplituds de les tensions simples de cada fase del trifàsic, el desfasament entre les fases i també es podria manipular la freqüència del sistema, però aquesta variable queda fixada a 50 Hz en aquest projecte. L'estructura del bloc i l'explicació del seu funcionament es troben explicats a l'annex 13.2.1.

Variables controlables	Valor inicial per defecte	Unitats
V_x	-	V
f	50	Hz
φ_a	0	°
φ_b	240	°
φ_c	120	°

Taula 4.1 Variables controlables del bloc de la xarxa

Un cop definida l'inici de la línia es defineix el que s'hi troba al final de tot d'aquesta, que com bé es sap és la càrrega de la xarxa (bloc de color vermell en la Figura 4.1). Aquesta càrrega es podria dissenyar de maneres diverses, però s'ha optat per el següent disseny: a partir de les potències actives, reactives i els desfasaments de les tensions de cada fase, es calculen els tres corrents equivalents necessaris per connectar-los a tres fonts de corrent que simularan la càrrega que es vol aconseguir. Aquestes corrents s'aconsegueixen amb les següents equacions:

$$\frac{Q_x}{P_x} = \frac{S \cdot \sin(\varphi_{V_x-I_x})}{S \cdot \cos(\varphi_{V_x-I_x})} = \tan(\varphi_{V_x-I_x}) \quad (2)$$

$$\varphi_{I_x} = \varphi_{V_x} - \varphi_{V_x-I_x} \quad (3)$$

$$I_x = \frac{S}{V_x} = \frac{\left(\frac{P}{\cos(\varphi_{V_x-I_x})} \right)}{V_x} \quad (4)$$

$$i_x = \sqrt{2} \cdot I_x \cdot \sin(\varphi_{I_x}) \quad (5)$$

Les variables a controlar d'aquest bloc són la potència activa i reactiva de cada fase, que a més a més poden ser variables amb el temps (annex 13.2.2). El desfasament de les tensions ve determinat mesurant directament a la xarxa amb l'ajuda d'un *Phase-Locked Loop* (PLL), que en català es coneix com un llaç de seguiment de fase. Un PLL és un circuit capaç de generar una oscil·lació la qual la fase que té es manté acotada a un senyal d'entrada, comptant per a això amb una realimentació que compara la fase de les dues senyals i actua modificant la freqüència de l'oscil·lació generada [20].

Variables controlables	Valor inicial per defecte	Unitats
P_x	-	W
Q_x	-	var

Taula 4.2 Variables controlables del bloc de càrrega

El tercer bloc de que està formada la bancada per realitzar les simulacions són els que es troben de color blau en la Figura 4.1 que es tracta del mateix bloc connectat en diferents punts de la línia. Aquesta caixa que té per nom mesuradors i indicadors permet recollir les mesures realitzades a les fases de la xarxa elèctrica per poder avaluar la seva qualitat a partir d'uns indicadors. Aquest bloc no té cap variable a controlar, les entrades que té venen directes de les línies i es genera les mesures i els càlculs a partir de blocs implementats per al MATLAB (annex 13.2.3).

Amb els blocs analitzats fins ara (xarxa, càrrega i mesuradors i indicadors) es poden implementar tota mena de xarxes i a la vegada controlar el seu comportament a partir de les dades s'emmagatzemen per dibuixar-les en un gràfic posteriorment. Tot i així es pot veure com en la Figura 4.1 s'ha implementat un quart bloc de color verd que s'anomena equip de mitigació d'errors que pot estar connectat a la xarxa o no amb l'ajuda d'uns interruptors. On s'ubica aquest bloc podrien anar implementats els equips i els elements que s'han especificat en el punt 3.3 que ajuden en la mitigació de problemes de subministrament. La finalitat de poder-lo connectar i desconnectar de la xarxa recau en què es pot fer una comparació dels resultats obtinguts per unes mateixes condicions d'una xarxa en que té l'equip de mitigació connectat o no. La comparació de resultats permet l'estudi de si l'equip connectat funciona correctament, és eficient o necessari per a una xarxa.

Com que les condicions de la xarxa no seran iguals depenen de si s'estudia mirant-la abans d'arribar a l'equip o sortint-ne d'ell, quan hi està connectat, és necessari col·locar un altre bloc de mesuradors i indicadors entre el bloc de la xarxa i l'equip controlador que tindrà un ús inútil quan no hi hagi cap element reductor de problemes de subministrament ja que mesurarà el mateix que el bloc mesuradors i indicadors que es troba davant de la càrrega de la xarxa.

Ja es té l'eina a punt per simular. La simulació es tractarà d'una xarxa que hi té una càrrega en què la seva càrrega varia al llarg del temps i que a més a més és diferent per cada fase. La xarxa li subministra a la càrrega un sistema de tensions trifàsics ideal i com aquesta canvia, obliga al sistema trifàsic de corrents a desequilibrar-se i adaptar-se a ella. Per tant en aquest projecte, el controlador serà l'encarregat de millorar la qualitat dels corrents elèctrics.

S'ha intentat portar la simulació a un grau més real, fent que la xarxa subministrés un sistema trifàsic de tensions no perfectes a la càrrega, però degut al temps de resolució que el programa requeria s'ha hagut d'adaptar els resultats a l'aproximació de que el sistema de tensions serà ideal.

4.2. Prototip per mitigar els problemes relacionats amb la qualitat del subministrament

El centre de tot l'estudi gira el voltant del prototip que es connectarà a la xarxa per mitigar els problemes relacionats amb la qualitat del subministrament.

A l'apartat de l'estat de l'art s'han definit algunes solucions per mitigar els problemes que la xarxa de distribució se li presenten. Amb tot el ventall ampli d'opcions, s'ha escollit implementar digitalment una solució, a partir de l'electrònica de potència, que intenta aplacar més d'un problema a la xarxa. Aquesta solució llegirà el que està passant a la xarxa, i a partir de la seva lectura, actuarà seguint un criteri, o bé un altre intentant garantint la màxima qualitat de la xarxa possible. Aquest equip que s'implementa no ha estat ni pensat ni dissenyat per l'autor d'aquest projecte, sinó que el seu disseny ha estat cedit per a l'elaboració de la memòria.

L'equip està format per dispositiu d'electrònica de potència que amb l'ajuda del software de SIMULINK és possible caracteritzar els dispositius i utilitzar-los en la simulació, però sorgeix un problema i és que el nombre de variables es dispara i amb elles les equacions amb les que el SIMULINK realitza la simulació. És per això que s'opta per elaborar la implementació digital a partir de les equacions matemàtiques que defineixen el comportament de l'equip electrònic amb la finalitat de reduir el temps de la simulació.

El disseny original del prototipus intenta abastar tres grans problemes que es poden trobar el trifàsic com bé són els harmònics, la potència reactiva i els desequilibris del sistema trifàsic. Com ja s'ha mencionat en l'abast del projecte, no es consideren que apareguin diferents freqüències a la xarxa sinó que s'aproxima aquesta dada i es considera que serà constant en tota la simulació, és per això que s'ha simplificat el prototipus i no s'ha implementat la part del que s'encarrega dels harmònics de la xarxa ja que seran inexistents al llarg de la simulació. Així doncs es té un equip connectat a la xarxa que té la missió d'equilibrar-la i reduir-ne la potència reactiva que consumeix.

Explicat de forma sintetitzada de com treballa, l'equip electrònic pren mesures d'intensitat i tensió simple de la xarxa elèctrica que són analitzades amb l'ajuda d'un controlador dinàmic i a partir d'aquest anàlisi injecta a la mateixa xarxa tres corrents elèctrics (un per cada fase) per acomplir els seus objectius.

El controlador dinàmic està caracteritzat amb un control proporcional i integral també conegut com a PI que té com a característiques que busca un compromís entre el transitori i la resposta temporal permanent assegurant que l'error del senyal sigui 0. Les constants que caracteritzen el controlador són la K_p i la K_i que tenen valors de 44,42 i $9,87 \cdot 10^4$ respectivament extretes de l'estudi que es va fer expressament per a la realització d'una de les parts del controlador [21]. Pot sobtar el valor tant elevat de la K_i però com es requereixen respostes de temps menors a 0,02 segons, que és el període d'un cicle de 50 Hz, s'arriba a justificar la magnitud de la constant.

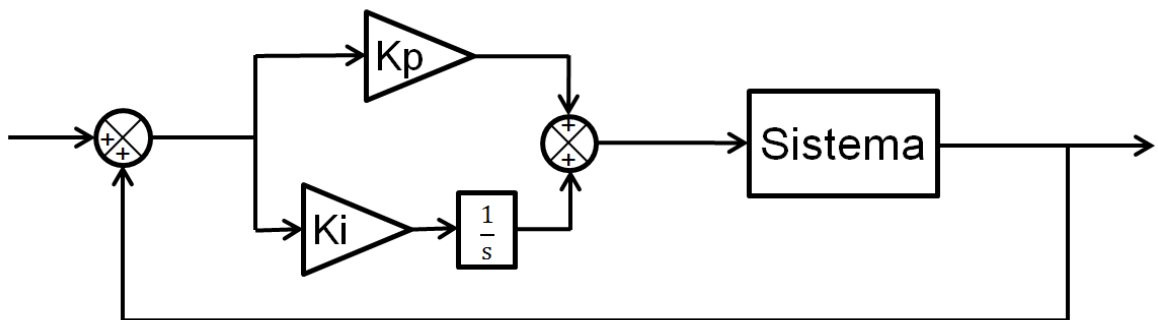


Figura 4.2 Esquema d'un controlador PI

El controlador dinàmic s'ajusta a la velocitat de la xarxa de les tensions que s'utilitzen en el funcionament de l'equip electrònic. El que fa aquest per equilibrar els corrents i reduir-ne la seva potència reactiva és agafar els corrents de la xarxa i amb l'ajuda del teorema de Fortescue, i les transformacions de Clarke i Park (que és aquí on es necessita la velocitat de les tensions), es resten la seva pròpia seqüència positiva (que és la part equilibrada i que interessa com estigui la xarxa) d'ells mateixos i amb els corrents restants que s'obtenen s'injecten a la xarxa. Amb això el prototipus s'assegura que la xarxa aigües amunt d'ell està equilibrada i no consumeix reactiva i que per tant és de qualitat. També s'assegura que la potència que és demanada arribi com és deguda. Es podria dir que l'equip electrònic s'encarrega d'introduir a la xarxa els corrents necessaris per desequilibrar-la i introduir la potència reactiva per a que així el transport i la distribució dels corrents abans de que arribin a ell estiguin equilibrats i la seva reactiva sigui zero i s'hi puguin connectar altres càrregues que no es vegin afectades per a la càrrega problemàtica.

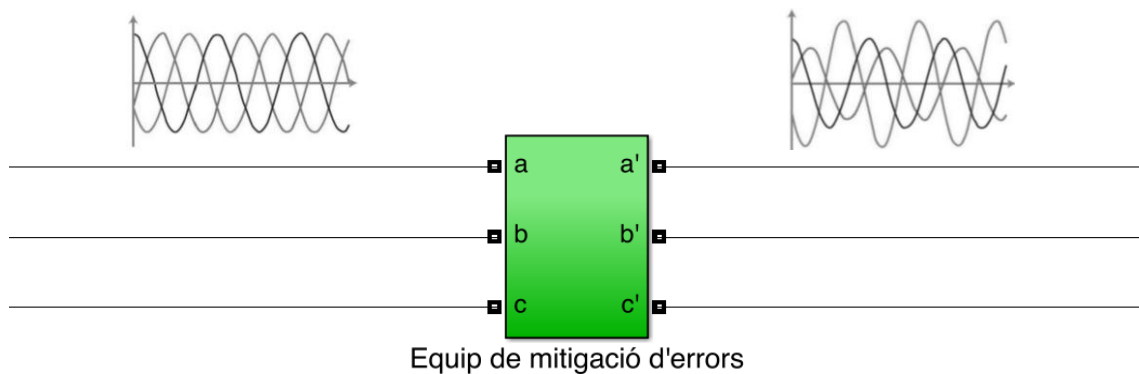


Figura 4.3 Esquema del funcionament del prototipus mitigador

4.3. Quantificació dels problemes

Per a la discussió dels resultats i solucions que s'analitzin en futurs apartats de la memòria és degut especificar quines són les mesures preses a la xarxa així com també les dades que es poden extreure amb les eines que proporciona el MATLAB.

Com s'ha comentat anteriorment, el bloc encarregat d'aquesta comesa és el de mesuradors i indicadors de la figura X. Les mesures emmagatzemades i que s'usaran en la discussió de la memòria consisteixen en les intensitats, les tensions simples, les potències actives i reactives i els factors de potència de cada fase de la xarxa. Per cada variable es guarden els valors que tenen al llarg del temps de la simulació. De tots aquests valors, el programari del MATLAB té integrades funcions que et permeten extreure dades destacables com són els seus màxims, els seus mínims o bé les seves mitjanes aritmètiques. També amb les dades es pot extreure'n les seves mitjanes quadràtiques que amb variables que tenen forma d'ona, com són les intensitats, es coneixen més habitualment amb el nom de valors eficaços.

També al tenir dos blocs mesuradors i indicadors de la xarxa es tindran emmagatzemades els valors de les variables a mesurar duplicades (sempre i quan el prototipus mitigador de problemes relacionats amb el subministrament). Les dades duplicades es distingeixen en funció de si són les mesures que veu la càrrega o bé són les mesures que veu la xarxa.

Mesures xarxa	Mesures càrrega	Unitats
V_x	V_x	V
I_x	I_x	A
P_x	P_x	W
Q_x	Q_x	var
f.d.p. _x	f.d.p. _x	∅

Taula 4.3 Mesures del bloc mesuradors i indicadors

Amb les mesures que es prenen, es poden discutir i analitzar àmpliament el comportament d'una xarxa, no obstant aquest fet, per ampliar la comprensió i enriquir els resultats s'ha decidit ampliar-los a dos indicadors que s'empraran en apartats futurs de la memòria.

El primer indicador implementat neix a partir de la necessitat de definir com d'equilibrat o desequilibrat es troba un sistema trifàsic. Per satisfer aquesta necessitat, s'ha optat per emprar l'ús del percentatge de desequilibri que s'aplicarà al sistema de corrents que és el que en principi presenta desequilibris i es defineix amb l'equació (6) [11].

$$\% \text{ desequilibri de corrent} = \frac{|\text{desviació màxima del corrent mig}|}{\text{corrent mig}} \cdot 100 \quad (6)$$

El segon indicador apareix per l'exigència de comparació dels resultats obtinguts en funció de si el prototipus es troba operatiu o no. Aquest és una eina matemàtica que es pot anomenar com al percentatge de reducció entre dues variables. L'indicador consisteix en la diferència de les dues variables que es volen comparar i dividir-la per la variable inicial, o la que es vol fer servir de referència. La fórmula és:

$$\% \text{ de reducció} = \left(\frac{X_0 - X_y}{X_0} \right) \cdot 100 \quad (7)$$

Si els resultats d'aplicar l'equació van del 0% al 100% vol dir que hi ha hagut una reducció de valor entre la segona i primera variable, en canvi si donés negatiu indicaria que hi ha hagut un augment de la segona variable respecte la primera.

5. CASOS D'ESTUDI

Els casos d'estudi del projecte venen donats i definits a partir de les dades que s'utilitzaran per realitzar les simulacions.

Aquestes dades són mesures reals preses de dues xarxes diferents les quals presenten problemes diversos degut a les càrregues que hi tenen connectades.

Cada xarxa té les seves dades en un full de càlcul del programari d'EXCEL. Les dades del full són preses cada quart d'hora, dit en altres paraules la diferència de temps comprès entre fila i fila de la taula de l'EXCEL és de 15 minuts. En total en les dues taules s'han recollit dades durant més de dos dies. Com que el salt temporal de 15 minuts és elevat per a la simulació en temps real s'aplica un canvi d'una escala temporal per reduir el temps de simulació. S'ha considerat arbitràriament que 15 minuts o fila de mostres quedarien compresos en 0,1s. La lectura i discussió que se'n farà no serà a una escala de temps real a no ser que s'especifiqui en el moment de la discussió i que es tornin a transformar a escala de temps real que en aquest cas es farà ús del següent factor de conversió:

$$t_{\text{simulació}} \cdot \frac{1 \text{ mostra}}{0,1 \text{ segons}} \cdot \frac{15 \text{ minuts}}{1 \text{ mostra}} \cdot \frac{1 \text{ hora}}{60 \text{ minuts}} \quad (8)$$

Per definir els casos d'estudi, al no tenir cap informació sobre les xarxes, aquestes s'anomenaran xarxa alfa i xarxa beta per a la seva distinció. El fet de ser xarxes completament independents obliga a realitzar dues simulacions, una per cada xarxa.

Com que el que es vol és estudiar la funcionalitat del prototipus mitigador i els efectes que genera a les xarxes, primer de tot s'ha de conèixer de què es caracteritzen i quines conductes tenen aquestes per tenir un punt de comparació. Aleshores es realitzaran dues simulacions per cada xarxa, una en què el prototipus no hi actua per entendre'n el seu comportament i una altra en que hi està connectat per eliminar-ne o reduir-ne els errors que s'hauran estudiat amb la simulació prèvia.

Recordant que l'equip electrònic té les missions de reduir els desequilibris i les potències reactives d'ambdues xarxes, en cada cas d'estudi s'enfocarà la anàlisi mirant sempre cap a les dades que donin la informació rellevant sobre aquests problemes.

Fent un petit sumari, els casos d'estudis seran dos, la xarxa alfa i la xarxa beta, on cadascun d'ells s'analitzarà la seva xarxa amb i sense controlador i es discutirà si els objectius que té aquest, s'acompleixen.

Per tenir una forma de definir les xarxes, es fa un petit resum sobre les dades que se'n tenen de cadascuna d'elles.

5.1. Xarxa alfa

De la xarxa de alfa es té una mostra de dades amb una llargada de 206 mesures. Això vol dir que es van prendre dades d'aquesta xarxa cada quart d'hora fins a 206 vegades el que equivaldria durant 2 dies i gairebé 9 hores. Transformant el temps de mostra total a l'escala temporal s'obté el temps total en que es simularà la mostra:

$$206 \text{ mostres} \cdot 15 \text{ minuts} \cdot \frac{0,1 \text{ segons} / \text{mostra}}{15 \text{ minuts}} = 20,6 \text{ segons} \quad (9)$$

Tot i així el càlcul no està finalitzat ja que es suposa que la primera mesura està realitzada en l'instant inicial (0 segons) i que per tant s'ha de restar 0,1 segons (o 15 minuts del temps real) per saber el temps total exacte que es simularà la mostra:

$$20,6 \text{ segons} - 0,1 \text{ segons} = 20,5 \text{ segons} \quad (10)$$

Pel que fa els desequilibris que presenta, es dibuixa amb un gràfic el sistema de corrents que té la xarxa sense el controlador connectat:

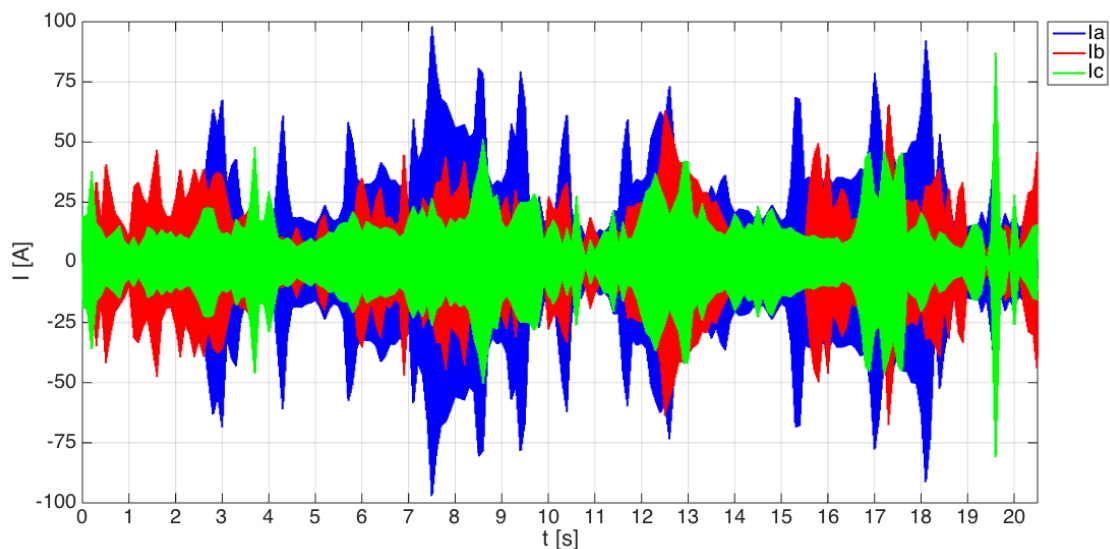


Figura 5.1 Sistema trifàsic dels corrents de la xarxa alfa sense el prototip connectat

En la Figura 5.1 es pot comprovar com la intensitat que s'està consumint de la xarxa està completament desequilibrada, i que pràcticament en tots els trams les amplituds són diferents entre elles. Es realitzarà el càlcul del percentatge de desequilibris de corrent es comprovant l'eficiència del prototip mitgador de problemes en el tram de màxim desequilibri que succeeix entre els temps de 7,3 segons i 7,6 segons, quan no hi té el prototip connectat i quan sí.

També es llegirà el gràfic de les potències actives en tota la mostra temporal per controlar el seu comportament.

Pel que fa el cas de la potència reactiva el seu gràfic en tot el temps de la simulació per cada fase és:

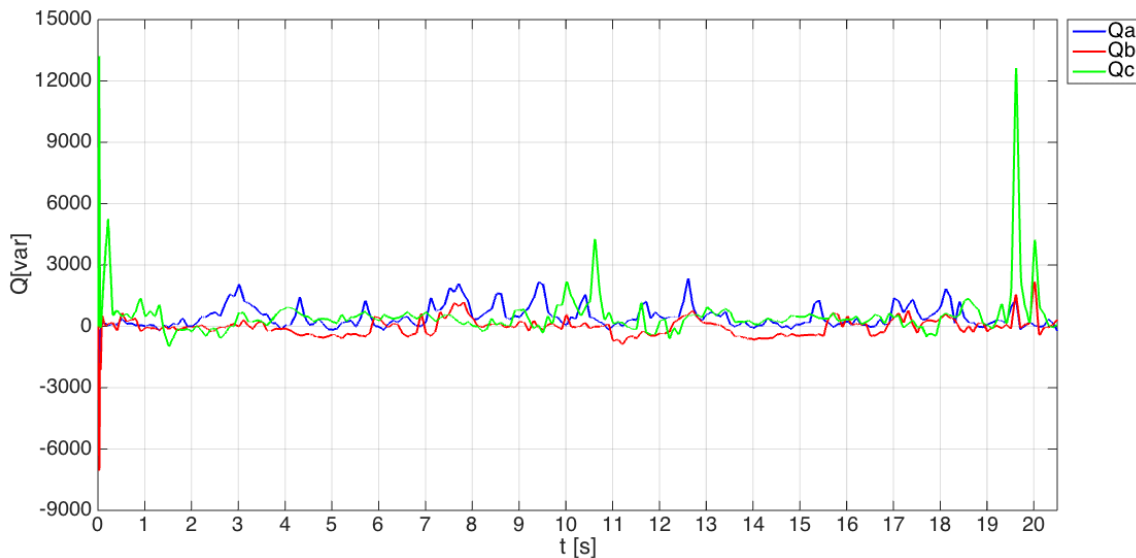


Figura 5.2 Potència reactiva per cada fase de la xarxa alfa

Primer de tot abans d'analitzar res, s'observa com es té un temps de transitorietat al principi i per aquest fet s'analitzaran les dades a partir del temps 0,5 segons per evitar desviacions en les conclusions que es puguin extreure, per tant es s'analitzaran 20 segons de la mostra inicial.

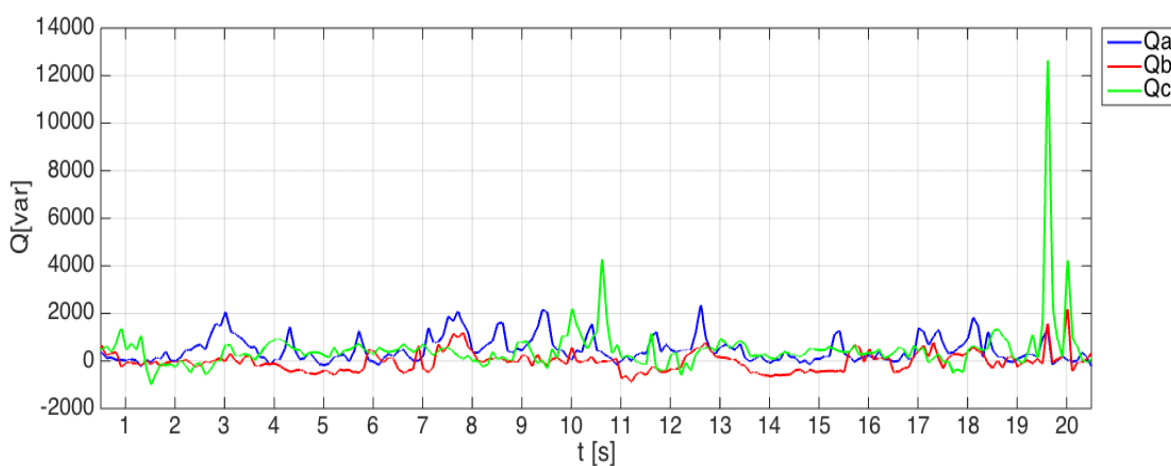


Figura 5.3 Potència reactiva per cada fase de la xarxa alfa sense transitoris

El que sobte del gràfic de la potència reactiva són els pics irregulars en les tres fases i que a més a més en la tercera fases s'arriba a un màxim altíssim. Per analitzar la potència reactiva es farà una distinció entre les fases per calcular-ne el seu percentatge de reducció en la potència reactiva mitjana, màxima i mínima si ho permeten els resultats que s'obtenen.

També per entendre millor la reducció de la potència reactiva i la millora en la qualitat de la xarxa s'analitza el factor de potència amb i sense el prototip mitigador. Amb les dades del factor de potència i els valors de la potència reactiva es calculen les despeses degut per excedència de consum de potència reactiva, explicades en el punt 3.2.2, i es veurà si amb la solució implementada són reduïdes o no.

Aquesta xarxa es caracteritza per tenir pics de reactiva i a més a més un consum irregular és per això que s'anomenarà amb el nom de: xarxa amb consum irregular i pics de reactiva.

5.2. Xarxa beta

La llargada de mostres que es tenen de la xarxa beta és més elevada que la xarxa alfa amb un total de 357 mostres preses i un lapse de temps de 15 minuts cadascuna d'elles. Per simular, es realitzar la transformació de l'escala temporal:

$$357 \text{ mostres} \cdot 15 \text{ minuts} \cdot \frac{0,1 \text{ segons}/\text{mostra}}{15 \text{ minuts}} = 35,7 \text{ segons} \quad (11)$$

Considerant que la primera mesura està realitzada en l'instant inicial (0 segons) i que per tant s'ha de restar 0,1 segons (o 15 minuts del temps real) per saber el temps total exacte que es simularà la mostra:

$$35,7 \text{ segons} - 0,1 \text{ segons} = 35,6 \text{ segons} \quad (12)$$

Per estudiar-ne els desequilibris, altre cop, es tornen a dibuixar en un gràfic el sistema de corrents de la xarxa:

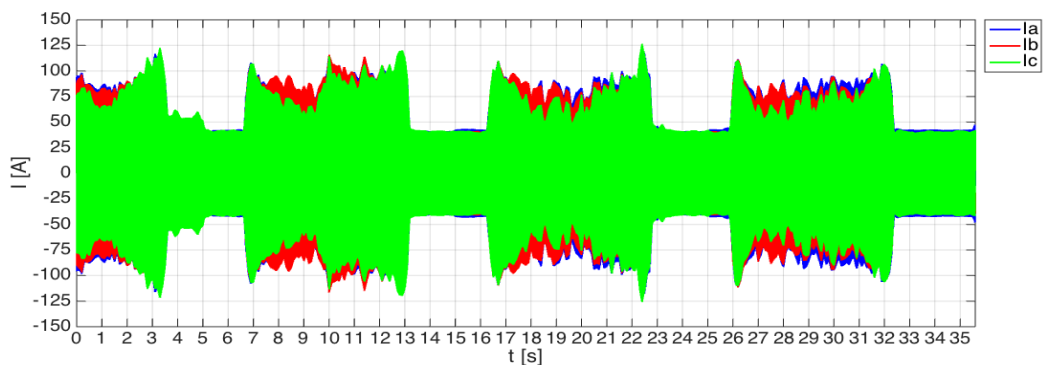


Figura 5.4 Sistema trifàsic dels corrents de la xarxa beta sense el controlador connectat

A primera vista sembla que el circuit queda molt marcat amb un cicle que es va repetint on es té un temps en què les intensitats són més elevades i desequilibrades amb valors que giren al voltant de 100 A i 125 A i la resta del temps es tenen intensitats més baixes i a primera vista més equilibrades amb valors que no arriben als 50 A. Per entendre millor a la xarxa fer un zoom a un cicle per extreure'n més informació.

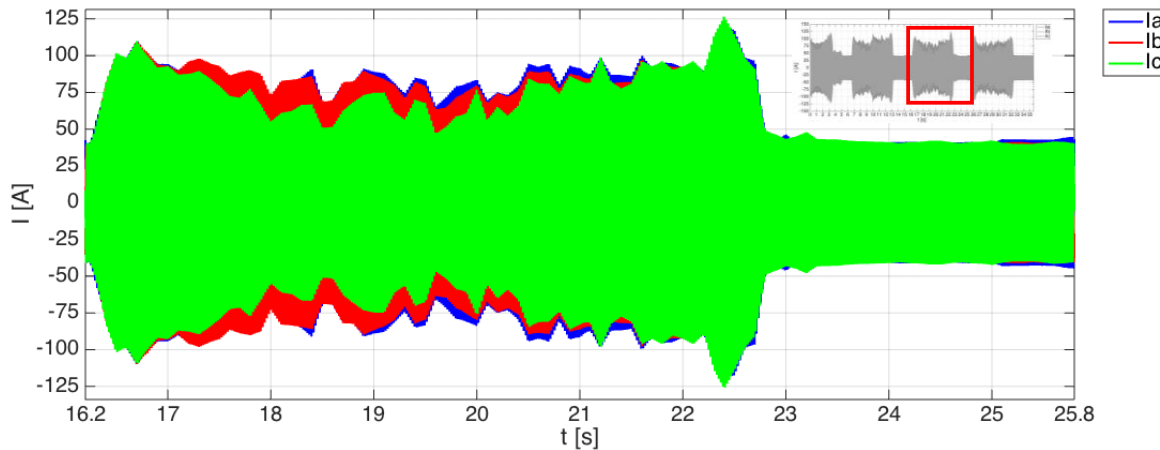


Figura 5.5 Sistema trifàsic dels corrents de la xarxa beta d'un cicle sense el controlador connectat

S'observa que el temps d'un cicle és la resta de 25,8s-16.2s que dona 9,6 segons que si es tornen a transformar a l'escala real dona exactament 24 hores, és a dir, un dia. De fet s'ha comprovat en les dades cedides (que es troben en l'annex) en l'instant de 16,2 correspon a les 5:15 del matí. Això ens indica que la xarxa en estudi té una demanda que es va repetint cada dia. A partir d'aquí tot l'estudi es realitzarà estudiant-ne un dia i extrapolant-ne els resultats ja que la variabilitat entre dies és molt poca. Es veu convenient canviar els valors de l'escala per les hores del dia que corresponen el temps simulat:

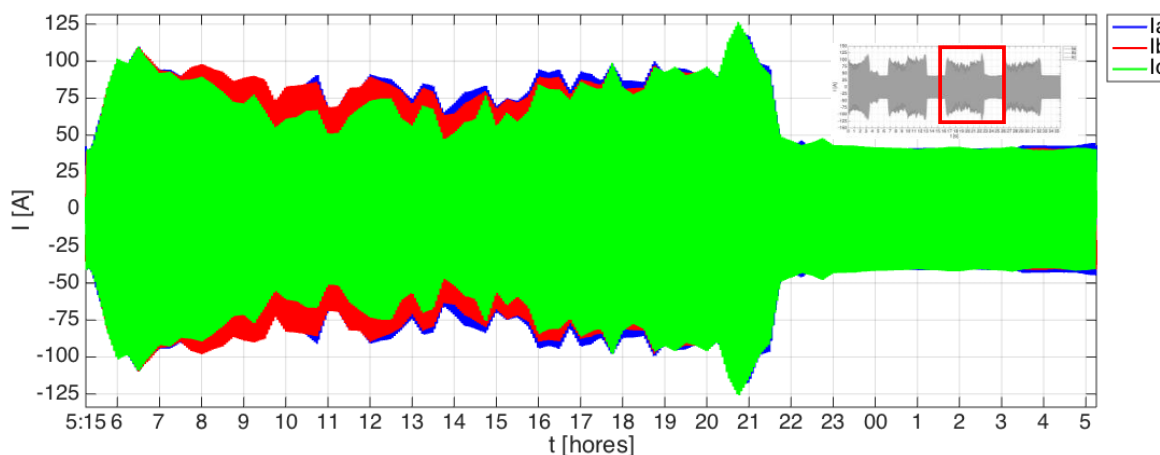


Figura 5.6 Sistema trifàsic dels corrents de la xarxa beta d'un cicle amb hores sense el controlador connectat

Per aquest cas, es comprovarà l'eficiència del prototip en el tram de màxim desequilibri que succeeix entre les 13:30 hores i les 14:00 hores.

En la xarxa beta també s'exploraran els gràfics que ens dibuixin les potències actives per cada fase per veure com es mitiguen els desequilibris que poden presentar.

En la potència reactiva s'estudiaran els gràfics en què hi apareixen els valors totals de les potències reactives per cada fase així com també els seus factors de potència i finalment se n'extrauran les despeses degudes a aquest consum.

Aquesta xarxa es caracteritza per tenir un consum cíclic en el temps, i és per això que s'anomenarà: xarxa amb consum cíclic.

Per fer un sumari, els casos d'estudi recollits en una taula són:

	Sense prototipus mitigador		Amb prototipus mitigador	
Xarxa amb consum irregular i pics de reactiva	Desequilibris	Potència reactiva	Desequilibris	Potència reactiva
Xarxa amb consum cíclic	Desequilibris	Potència reactiva	Desequilibris	Potència reactiva

Taula 5.1 Casos d'estudi que s'analitzen

6. RESULTATS I DISCUSSIÓ

En el següent punt de la memòria es presenten els resultats i els anàlisis de les simulacions fetes. En aquí s'empren gràfics mostrant mesures realitzades a la xarxa i en tots es segueixen un parell de directrius per fer més ràpida, fàcil i comprensible la lectura per al lector: quan hi apareguin trifàsics es marcarà amb un color diferent cada fase i intentant mantenint-lo en tots els gràfics el mateix, també quan es facin comparacions entre les mateixes dades de quan s'aplica el prototip mitigador o no es marcaran més clares les dades que no s'ha aplicat el prototip i amb el mateix color però més fort aquelles que són conseqüència de l'equip electrònic. Tanmateix, en tots els gràfics es trobaran senyalitzats degudament amb les seves llegendes perquè no hi hagi possibles confusions.

6.1. Xarxa amb consum irregular i pics de reactiva

6.1.1. Sense prototip mitigador

Desequilibris

A partir de la Figura 5.1 estudiada en l'apartat anterior s'il·lustra el tram que presenta el màxim desequilibri per calcular-ne el percentatge:

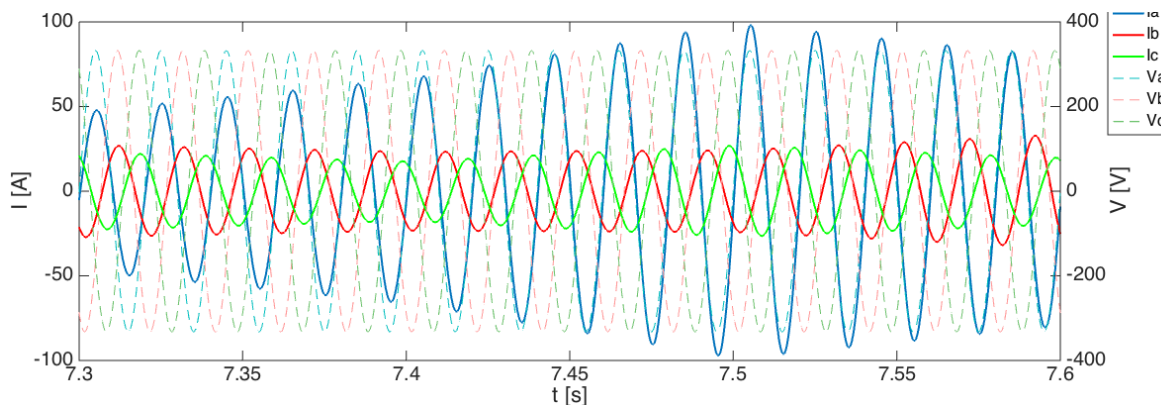


Figura 6.1 Sistema trifàsic de tensions i corrents en el tram de temps amb més desequilibri

	Ia [A]	Ib [A]	Ic [A]	Mitjana [A]
Valor eficaç	55,11	18,41	15,57	29,70

Taula 6.1 Mitjanes quadràtiques dels corrents de la xarxa i la mitjana aritmètica en el màxim desequilibri

$$\% \text{desequilibri de corrent} = 85,56\%$$

(13)

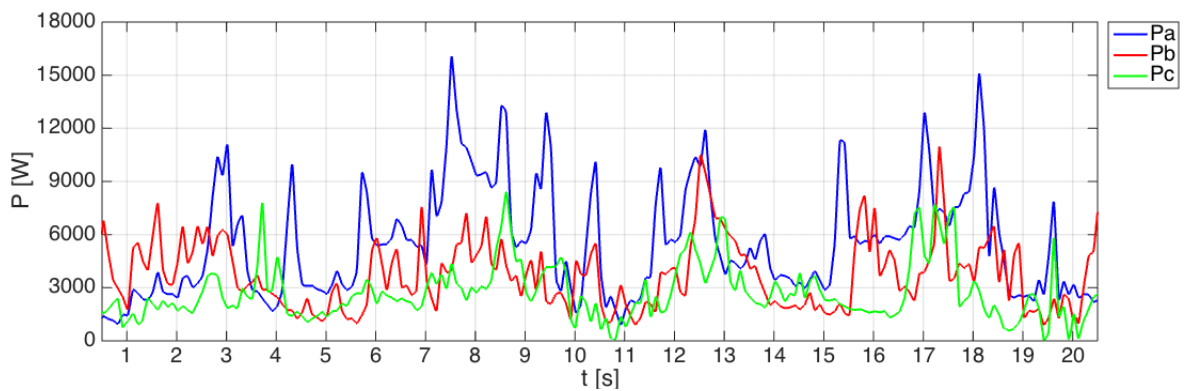


Figura 6.2 Potències actives de cada fase desequilibrada

En la Figura 5.1 no es podien diferenciar les ones que formen els corrents elèctrics ja que la mostra temporal és elevada i una ona es genera cada 0,02 segons (ja que la freqüència de la línia és de 50 Hz) és per això que les fases es veuen com un color sòlid. En canvi en l'estudi d'on es troba el màxim desequilibri, es distingeixen les ones que s'han format. Aquest cop en el mateix gràfic s'hi troben les ones de tensió simple que permeten la visió de com interactuen amb les de corrent amb un segon pla.

Gràcies a la Figura 6.1 es veu clarament com les tensions de la xarxa són equilibrades i ideals, i els corrents elèctrics estan completament desequilibrats degut a la càrrega desigual que consumeix de la xarxa. També es pot observar com les fases entre els corrents i les tensions simples estan molt iguals, que voldria dir que el factor de potència té un valor molt pròxim a 1 i que per tant la xarxa està consumint poca potència reactiva, però ja es farà un estudi més exhaustiu sobre aquesta dada més endavant a la memòria.

Amb l'indicador de percentatge de desequilibri de corrent queda ben marcat com el sistema té problemes seriosos de desequilibris, de fins a més de 85% en un dels trams més crítics.

El consum de potència activa també un comportament molt desequilibrat com s'il·lustra en la Figura 6.1. Es pot veure com la fase a és la que té una demanda més elevada desmarcant-se molt de les altres dues que tot i està desequilibrades tenen demandes d'energia més o menys del mateix ordre de magnituds.

Potència reactiva

Pel que fa la potència reactiva amb la Figura 5.3 queden il·lustrats els valors al llarg del temps de la potència reactiva consumida per a cada fase sense cap transitorietat inicial. Tot i així, per a discutir millor els resultats es realitza una taula on s'indiquen els màxims de potència reactiva, els mínims i la mitjana total per fase:

Potència reactiva	Q Màxima [var]	Q Mínima [var]	Q Mitjana [var]
Fase a	2.350,0	-221,3	451,4
Fase b	2.184,9	-876,3	-50,71
Fase c	12.636,0	-979,6	477,3

Taula 6.2 Potència reactiva màxima, mínima i mitjana per cada fase

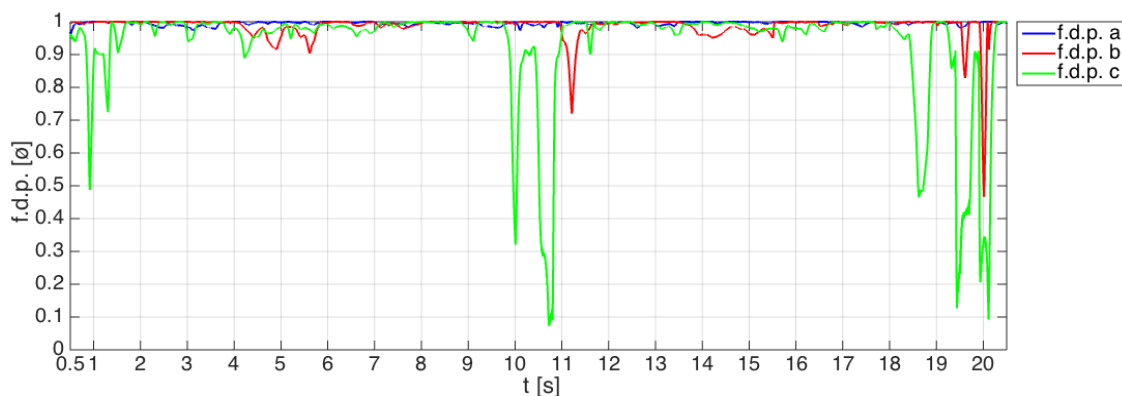


Figura 6.3 Factor de potència de cada fase de la xarxa

Fase	$\cos(\varphi)$	Mitjana potència reactiva	Temps simulació	Temps real	Cost	Preu
	$[\phi]$	[kvar]	[s]	[h]	[€/kvarh]	[€]
a	$1 > \cos(\varphi) > 0,95$	0,451	20	50	0	0
a	$0,95 > \cos(\varphi) > 0,8$	0	0	0	0,041554	0
a	$0,8 > \cos(\varphi)$	0	0	0	0,062332	0
b	$1 > \cos(\varphi) > 0,95$	$-46,1 \cdot 10^{-3}$	18,89	47,225	0	0
b	$0,95 > \cos(\varphi) > 0,8$	0,632	0,94	2,35	0,041554	0,06
b	$0,8 > \cos(\varphi)$	1,282	0,17	0,425	0,062332	0,03
c	$1 > \cos(\varphi) > 0,95$	0,290	15,87	39,675	0	0
c	$0,95 > \cos(\varphi) > 0,8$	0,688	2,37	5,925	0,041554	0,17
c	$0,8 > \cos(\varphi)$	2,243	1,76	4,4	0,062332	0,62

Taula 6.3 Recull dels temps on el factor de potència es redueix i càlcul de la seva despesa

	Fase a	Fase b	Fase c	Total (50h)	Mensual (720h)	Anual (262.800h)
Despesa a pagar sense controlador [€]	0	0,09	0,79	0,88	12,67	152,06

Taula 6.4 Recull de les despeses a pagar per la reducció del f.d.p. per fases i totals

Amb l'ajuda de la Taula 6.2 es pot observar com aquesta xarxa té una potència reactiva de caràcter molt més inductiu que capacitiu. Observant la Figura 5.3 sembla que la fase que està més estable i prop del 0 al llarg del temps és la fase b, que a més a més té la mitjana més petita de les tres fases de -50,71var. Pel que respecte a la fase a va generant pics de potència reactiva que molt possiblement siguin susceptibles a una baixada important del factor de potència. Finalment, la fase c té el pic que crida més l'atenció del gràfic ja que arriba a ser aproximadament 6 vegades més grans que els pics més elevats de les altres fases, a més a més, a part d'aquest, n'hi ha dos més al voltant de 4000 var que també superen els màxims de potència reactiva de les altre dues fases. La fase c també conté la potència màxima capacitiva -979,6 var però en aquest cas no es desmarca gaire de les altres dues fases.

Amb la Figura 6.3 es comprova com els augments i les reduccions de potència reactiva afecten al factor de potència i amb ell el percentatge de potència reactiva que es té en el total de la potència aparent. La fase que manté millor el factor de potència és la fase a que en cap moment té un valor inferior de 0.9 el que ens vindria a dir que pràcticament tota l'energia aparent és energia activa i per que per tant la qualitat de la xarxa és bona. La fase b es manté també prop de valor de 1 però en té alguna caiguda que s'hauria de mirar de reduir. I la fase c presenta variacions i caigudes de factor de potència que ens indiquen que en certs moments la potència reactiva és molt més elevada que l'activa.

Pel que fa a la Taula 6.3 i a la Taula 6.4 queda clar que la xarxa no té una reducció de factors de potència suficient com per tenir grans despeses per excés de consum d'aquesta. Tot i així si realment l'equip electrònic que es connecta a la xarxa funciona, aquestes s'haurien de veure reduïdes i ajudar el consumidor de la càrrega a estalviar-se alguns diners encara que siguin pocs.

6.1.2. Amb prototip mitigador

Desequilibris

S'han dibuixat els mateixos trams de temps de la Figura 5.1 i de la Figura 6.1 per identificar com canvia el seu comportament amb el controlador connectat:

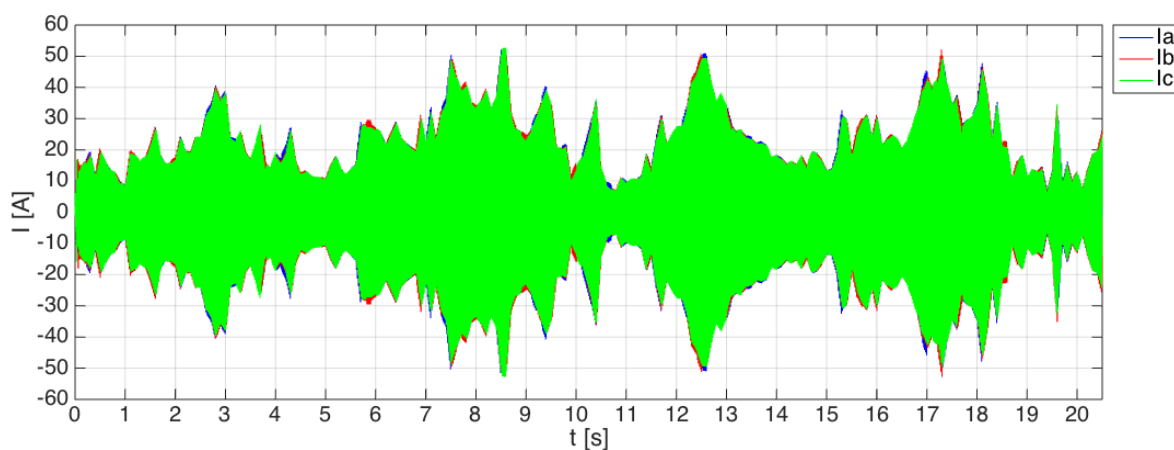


Figura 6.4 Sistema trifàsic dels corrents equilibrats gràcies al controlador connectat a la xarxa

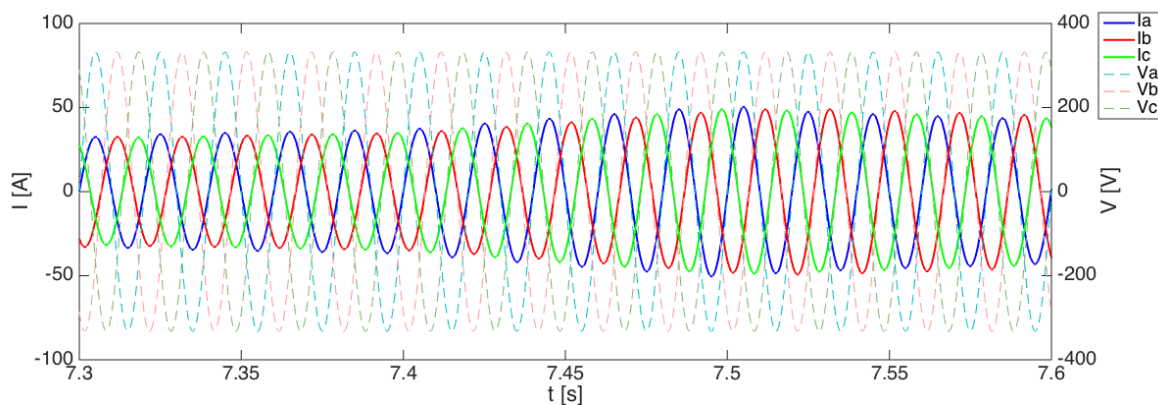


Figura 6.5 Sistema trifàsic de tensions i corrents equilibrats on era el tram de temps amb més desequilibri

	Ia [A]	Ib [A]	Ic [A]	Mitjana [A]
Valor eficaç	29,64	29,13	29,13	29,30

Taula 6.5 Mitjanes quadràtiques i mitjana aritmètica dels corrents equilibrats en el tram amb més desequilibri

$$\% \text{desequilibri de corrent} = 1,15\% \quad (14)$$

Mostra temporal	Desequilibris sense controlador [%]	Desequilibris amb controlador [%]	Reducció de desequilibris [%]
Màxim desequilibri	85,56	1,15	98,67

Taula 6.6 Recull dels desequilibris sense i amb equip i la reducció de desequilibris obtinguda

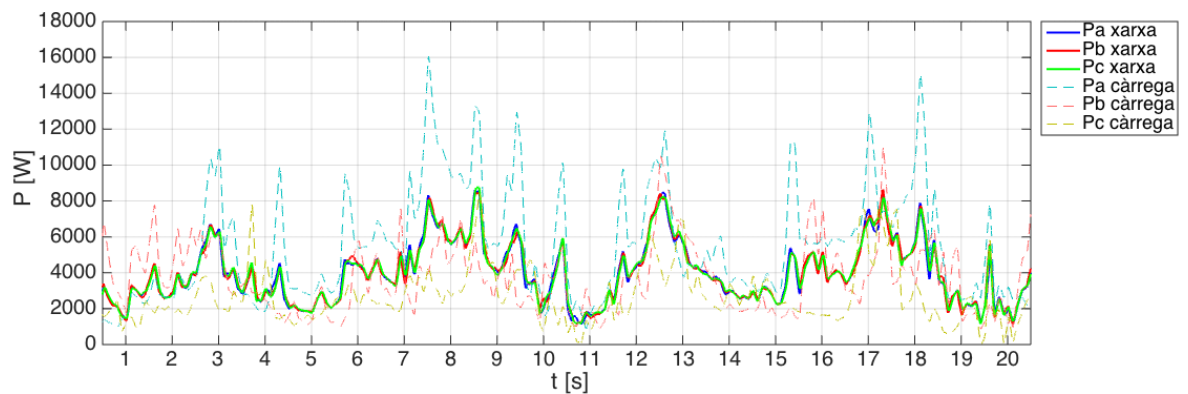


Figura 6.6 Potències actives de cada fase vistes des de la xarxa i la càrrega

El canvi de passar a estar desequilibrada a equilibrada és molt notori, sobretot en la fase a on es tenien pics de fins a 90 A desmarcant-se molt de les altres dues fases. També en la Figura 6.5 es pot veure com les fases de les ones de la potència i dels corrents coincideixen i que la potència reactiva es veurà més reduïda que quan no es té el controlador connectat.

L'equip electrònic té una alta efectivitat inclús en el tram on el desequilibri és màxim en què s'obté una reducció dels desequilibris de més del 95%.

Amb la Figura 6.6 de potències actives també es veu com la potència vista des de la xarxa es troba un estat d'equilibri a diferència de la potència que està consumint la càrrega, que coincideix amb la que es veia a la xarxa quan no hi estava actuant el prototip.

Potència reactiva

En aquest cas, s'han separat les potències reactives en tres gràfics diferents, per poder comparar la potència reactiva que veu consumida la xarxa amb la que realment consumeix la càrrega del circuit (la potència de la càrrega coincideix en la potència reactiva de la xarxa de quan no hi actua el prototip mitigador):

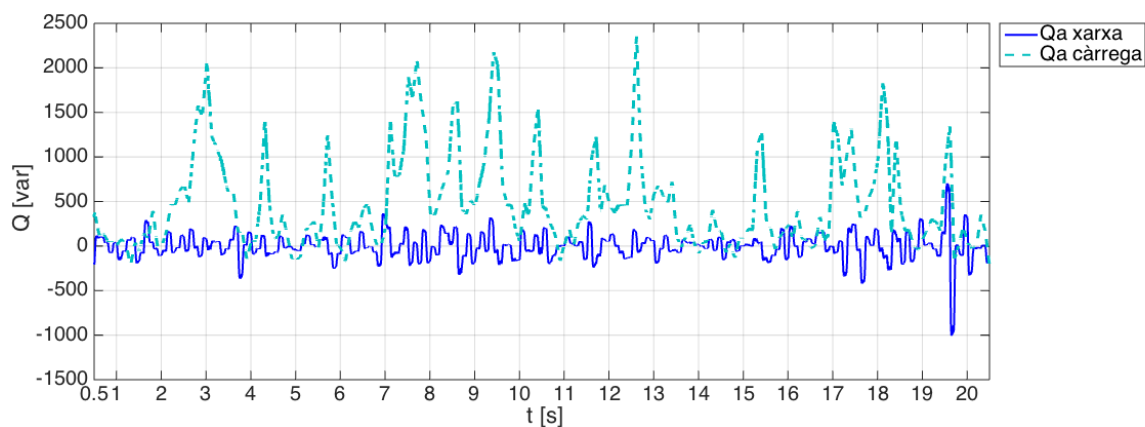


Figura 6.7 Potència reactiva de la fase a vista des de la xarxa i la càrrega

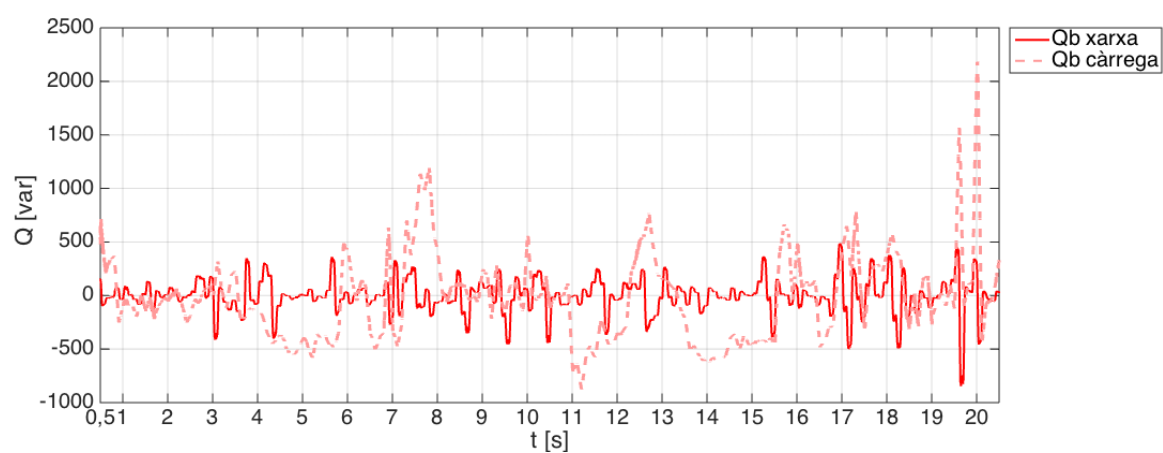


Figura 6.8 Potència reactiva de la fase b vista des de la xarxa i la càrrega

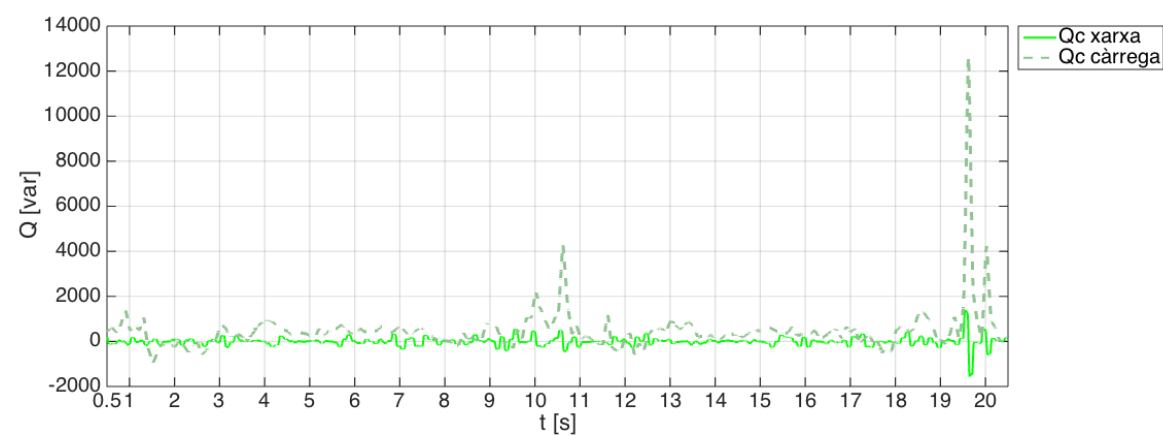


Figura 6.9 Potència reactiva de la fase c vista des de la xarxa i la càrrega

Potència reactiva	Punt de vista	Q Màxima [var]	Q Mínima [var]	Q Mitjana [var]	Reducció de la Q mitjana [%]
Fase a	Q xarxa	703,2	-1006,6	-1,27	99,72%
	Q càrrega	2.350,0	-221,3	451,4	
Fase b	Q xarxa	489,1	-847,0	-2,87	94,3%
	Q càrrega	2.185	-876,3	-50,71	
Fase c	Q xarxa	1.392	-1566	-1,41	99,7%
	Q càrrega	12.636,0	-979,6	477,3	

Taula 6.7 Recull de potències reactives les màximes, mínimes i mitjanes de cada fase vistes des de la xarxa o la càrrega amb càlcul de la reducció acomplida per a la potència mitjana

Potència reactiva	Punt de vista	Q Màxima [var]	Reducció de la Q màxima [%]
Fase a	Q xarxa	703,2	70,08%
	Q càrrega	2.350,0	
Fase b	Q xarxa	489,1	77,61%
	Q càrrega	2.185	
Fase c	Q xarxa	1.392	88,98%
	Q càrrega	12.636,0	

Taula 6.8 Càlcul de la reducció de la potència reactiva màxima

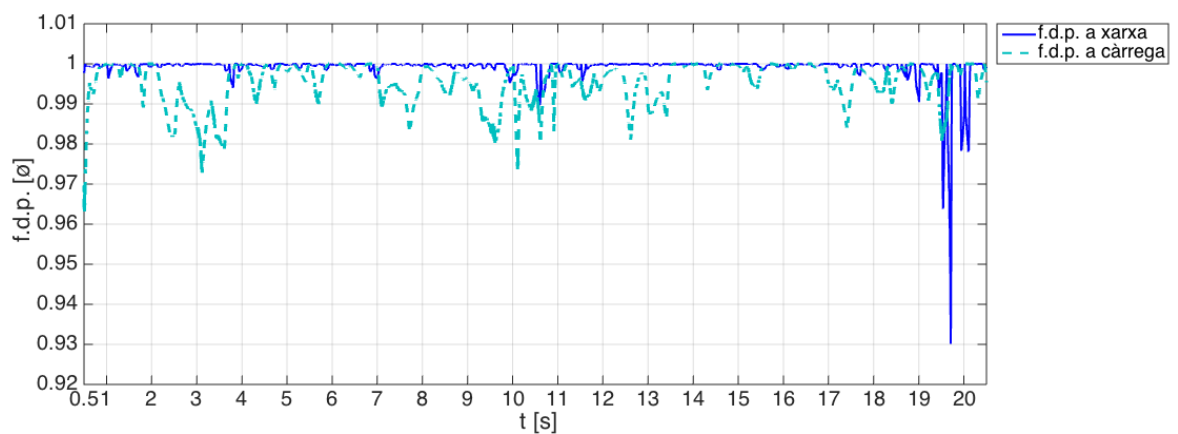


Figura 6.10 f.d.p. de la fase a vista des de la xarxa i la càrrega

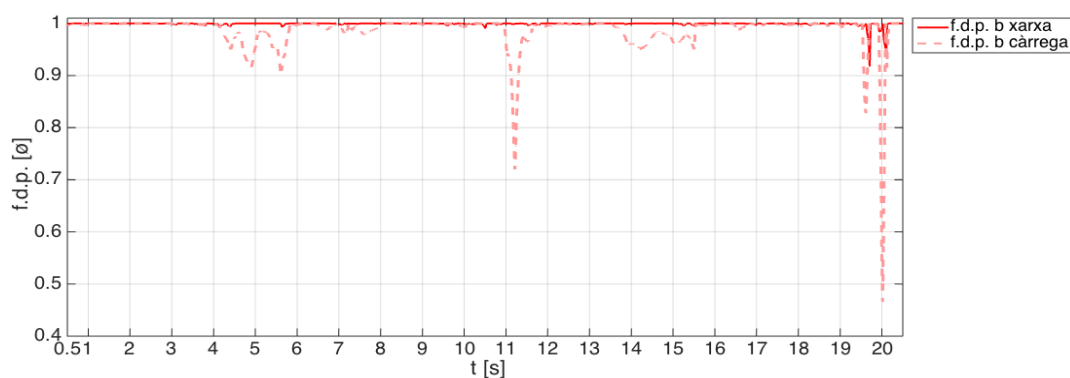


Figura 6.11 f.d.p. de la fase b vista des de la xarxa i la càrrega

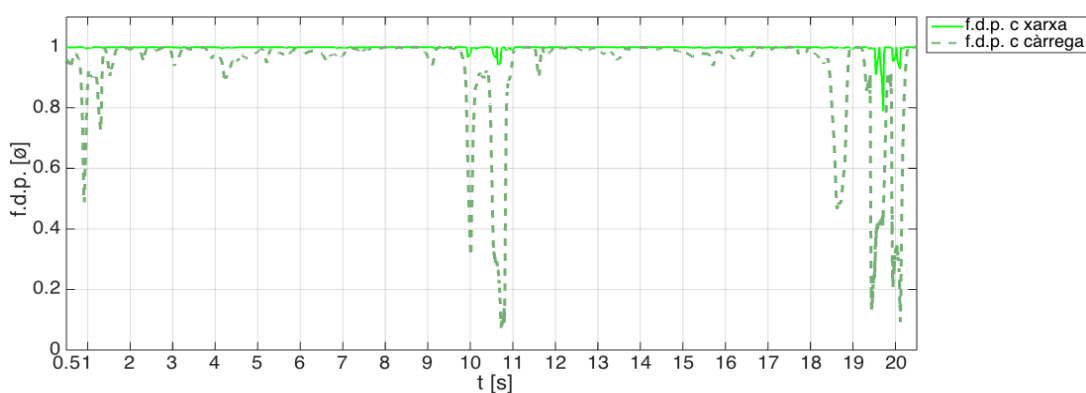


Figura 6.12 f.d.p. de la fase c vista des de la xarxa i la càrrega

Fase	$\cos(\varphi)$	Mitjana potència reactiva	Temps simulació	Temps real	Cost	Preu
	$[\varphi]$	$[\text{kvar}]$	$[\text{s}]$	$[\text{h}]$	$[\text{€/kvarh}]$	$[\text{€}]$
a	$1 > \cos(\varphi) > 0,95$	$-3,54 \cdot 10^{-3}$	19,98	49,95	0	0
a	$0,95 > \cos(\varphi) > 0,8$	-0,8312	0,02	0,05	0,041554	0,002
a	$0,8 > \cos(\varphi)$	0	0	0	0,062332	0
b	$1 > \cos(\varphi) > 0,95$	$-54,61 \cdot 10^{-3}$	19,94	49,85	0	0
b	$0,95 > \cos(\varphi) > 0,8$	-0,560	0,06	0,15	0,041554	0,003
b	$0,8 > \cos(\varphi)$	0	0	0	0,062332	0
c	$1 > \cos(\varphi) > 0,95$	$-1,41 \cdot 10^{-3}$	19,75	49,375	0	0
c	$0,95 > \cos(\varphi) > 0,8$	0,851	0,23	0,575	0,041554	0,02
c	$0,8 > \cos(\varphi)$	0,9931	0,02	0,05	0,062332	0,003

Taula 6.9 Recull dels temps on el factor de potència es redueix i càlcul de la seva despesa

	Fase a	Fase b	Fase c	Total (50h)	Mensual (720h)	Anual (262.800h)
Despesa a pagar sense prototip [€]	0	0,09	0,79	0,88	12,67	152,06
Despesa a pagar amb prototip [€]	0,002	0,003	0,023	0,028	0,403	4,838

Taula 6.10 Comparació de les despeses a pagar per consum de potència reactiva amb o sense prototip

En les tres fases el valor de potència reactiva que la xarxa veu consumida és reduït molt fortament gràcies a l'equip controlador connectat. En la majoria dels temps la potència reactiva és menor que quan hi ha el controlador i quan no és així, és perquè la potència reactiva consumida és molt petita i la diferència entre elles és pràcticament ínfima. Tot i així, hi ha un moment en la Figura 6.7, la Figura 6.8 i la Figura 6.9 que les tres fases estan consumint un pic de reactiva de caràcter capacitiu elevat en l'instant de 19,7 segons. Aquest esdeveniment molt possiblement s'explica a que en el temps de 19,5 segons tant la fase b com la c tenen un pic de potència reactiva de caràcter inductiva de 2.184,9 var i 12.636 var respectivament que obliguen al controlador a realitzar un sobrepuig molt elevat que obliga a oscil·lar el sistema al valor que vol compensar, en aquest cas seria el 0 var, i allargar el temps d'assentament. Per tant es podria arribar a afirmar que un canvi brusc en el consum de la potència reactiva obliga a l'equip electrònic la necessitat d'un temps per estabilitzar el sistema que està controlant i fa notori a la xarxa una transitorietat per estabilitzar-la.

Els resultats de la Taula 6.7 són positius ja que la mitjana potència es veu reduïda en més del 90% en les tres fases de la xarxa. Es veu també que quan la xarxa conté menys potència reactiva l'equip té una eficiència inferior que quan la xarxa en té més inicialment. Però, encara se'n pot treure més informació, l'eficiència de l'equip es veu reduïda quan es tracta de punts crítics com són els màxims de la potència reactiva en la Taula 6.8. Aquest anàlisi no es pot realitzar quan la potència és mínima (o de caràcter reactiu) ja que no es pot veure una reducció en els valors mínims de la xarxa degut al temps de transitorietat que el controlador empra per equilibrar el pic màxim que succeeix en la fase c.

El factor de potència també es veu reduït en les tres fases però altre cop com es pot comprovar en la Figura 6.10 en la Figura 6.11 i en la Figura 6.12, per culpa de la fase c de la xarxa, la fase a en surt perjudicada ja que en l'instant 19,7s té una baixada del factor de potència que d'altra manera no existiria si l'equip electrònic no hi actués.

El cost de la despesa que s'ha de pagar com a penalització del consum de la potència reactiva, efectivament es veu reduït tot i que el cost no fos elevat de per sí, però tot i així són diners que un es pot estalviar tal i com queda indicat en la Taula 6.9 i en la Taula 6.10.

6.2. Xarxa amb consum cíclic

6.2.1. Sense prototip mitigador

Desequilibris

Les dades obtingudes sobre la Figura 5.6 sobre el desequilibri de la xarxa són:

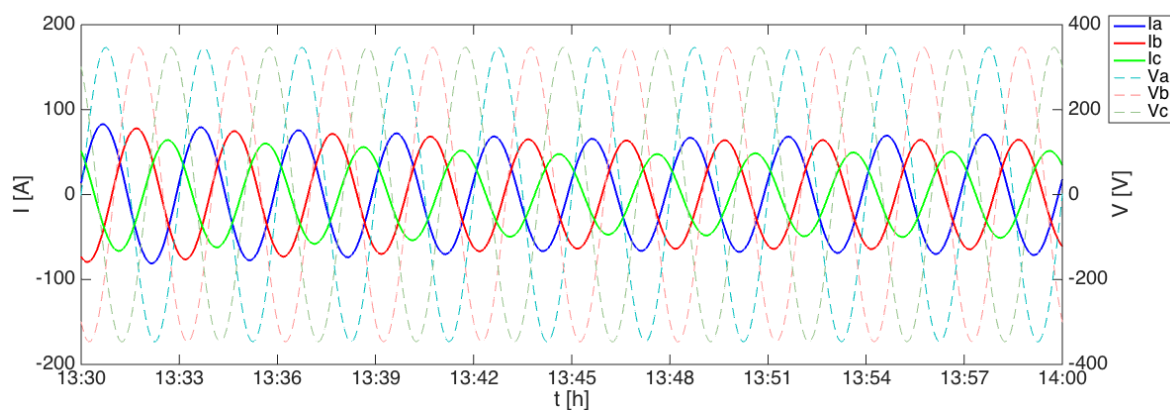


Figura 6.13 Sistema trifàsic de tensions i corrents en el tram de temps amb més desequilibri

	Ia [A]	Ib [A]	Ic [A]	Mitjana [A]
Valor eficaç	51,27	47,55	37,23	45,35

Taula 6.11 Mitjanes quadràtiques dels corrents de la xarxa i la mitjana aritmètica en el màxim desequilibri

$$\% \text{desequilibri de corrent} = 17,9\%$$

(15)

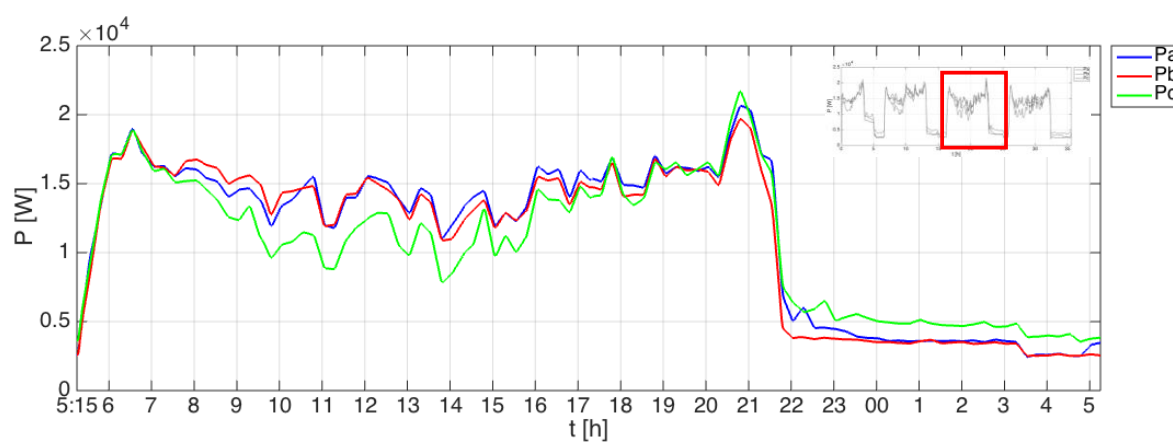


Figura 6.14 Potència activa de les tres fases de la xarxa en el tram d'un dia

Recordant a la Figura 5.6 la xarxa necessita un consum més elevat d'intensitat al llarg del dia i a la nit es veu reduït. El consum més elevat obliga a la xarxa a desequilibrar-se i a la nit sembla que té un millor equilibri de les tres fases. Possiblement es tracti d'una xarxa ubicada en una zona industrialitzada que treballen al llarg del dia i que a la nit o redueixen la producció o la tallen del tot.

El desequilibri calculat entre les 13:30 i les 14:00 és de 17,9% que és un percentatge que comença a ser preocupant per a una xarxa. També és cert però, que és el moment del dia amb més desequilibri de la xarxa i que per tant la major part del temps té uns percentatges de desequilibris menors. Figura 6.14 ens ajuda a definir millor la xarxa i demostra com durant el dia el consum de la potència activa és molt més elevada que al llarg de la nit. També es fan visibles els desequilibris entre les potències en certs moments del dia però és completament visible com aquesta xarxa té un millor equilibri que l'anterior estudiada en l'apartat 6.1.

Potència reactiva

Un cop vist i analitzat els desequilibris es passa a fer un gràfic de la potència reactiva que es troba en cada fase de la línia en el dia que s'està analitzant:

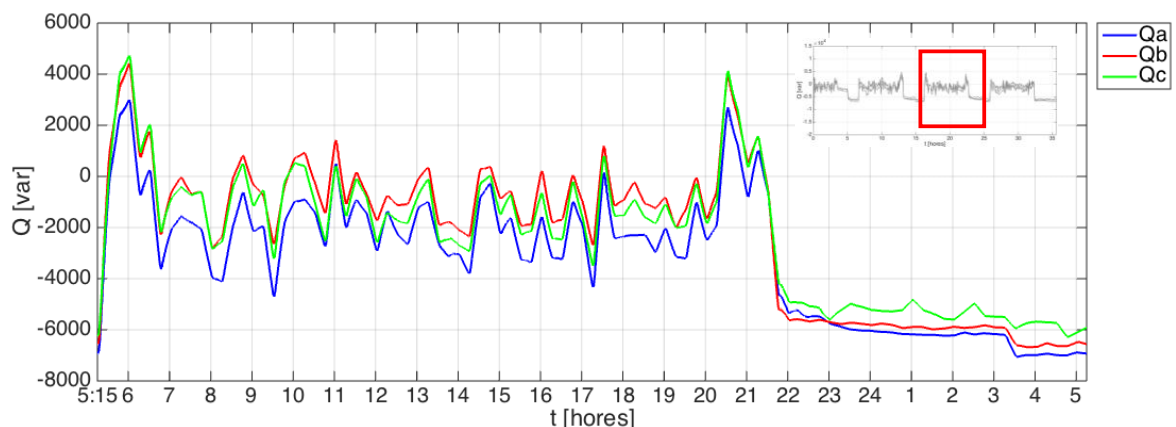


Figura 6.15 Potència reactiva de cada fase de la xarxa en el tram d'un dia

Potència reactiva	Q Màxima [var]	Q Mínima [var]	Q Mitjana [var]
Fase a	3004	-7058	-3166
Fase b	4426	-6675	-2249
Fase c	4726	-6280	-2290

Taula 6.12 Potència reactiva màxima, mínima i mitjana de cada fase de la xarxa en un dia

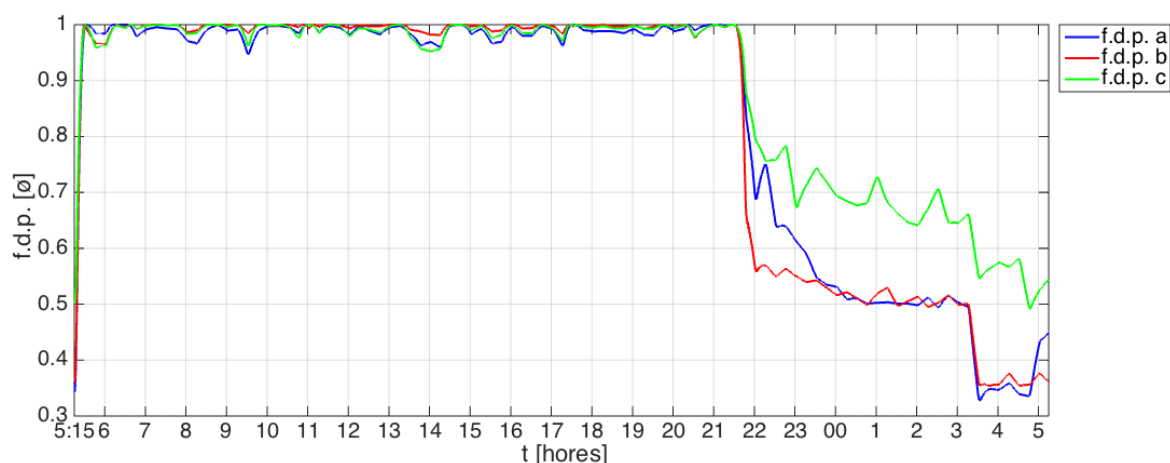


Figura 6.16 Factor de potència de cada fase de la xarxa en un dia

Fase	$\cos(\varphi)$	Mitjana potència reactiva	Temps simulació	Temps real	Cost	Preu
	$[\varphi]$	[kvar]	[s]	[h]	[€/kvarh]	[€]
a	$1 > \cos(\varphi) > 0,95$	-1,681	6,43	16,075	0	0
a	$0,95 > \cos(\varphi) > 0,8$	-3,502	0,12	0,3	0,041554	0,04
a	$0,8 > \cos(\varphi)$	-6,208	3,05	7,625	0,062332	2,95
b	$1 > \cos(\varphi) > 0,95$	-0,391	6,43	16,075	0	0
b	$0,95 > \cos(\varphi) > 0,8$	-2,691	0,07	0,175	0,041554	0,02
b	$0,8 > \cos(\varphi)$	-5,993	3,1	7,75	0,062332	2,9
c	$1 > \cos(\varphi) > 0,95$	-0,761	6,43	16,075	0	0
c	$0,95 > \cos(\varphi) > 0,8$	-2,649	0,17	0,425	0,041554	0,05
c	$0,8 > \cos(\varphi)$	-5,379	3	7,5	0,062332	2,51

Taula 6.13 Recull dels temps on el factor de potència es redueix i càlcul de la seva despesa

	Fase a [1 dia]	Fase b [1 dia]	Fase c [1 dia]	Tres fases [1 dia]	Mes [30 dies]	Any [365 dies]
Despesa a pagar [€]	2,99	2,91	2,53	8,43	252,9	3076,96

Taula 6.14 Recull de les despeses a pagar per la reducció del f.d.p. per fases i totals

Primer de tot en la miniatura de la Figura 6.15 es comprova que la potència reactiva també és cíclica dia a dia i que per tant també es realitza l'estudi en un dia per treure'n les conclusions corresponents. A priori i al llarg del dia sembla que la xarxa no consumeix grans

quantitats de reactiva i que a més a més les tres fases tenen molt semblants els valors totals. Però a la nit, la xarxa li creix la potència reactiva capacitiva que podria ser preocupant i arribar a ser un problema.

Observant la Figura 6.15 i la Taula 6.12 es pot afirmar fàcilment que la potència de la xarxa té un caràcter més capacitiu que inductiu tot i que consumeix dels dos tipus al llarg del temps.

Amb la Figura 6.16 es pot comprovar com al llarg del dia el factor de potència es manté molt a la vora del valor de la unitat, fet que ens indica que pràcticament tot la potència aparent consumida és de potència activa. El problema ve quan a partir de la nit la qualitat de la xarxa cau i amb ella el factor de potència i segurament aquest fet forçarà al consumidor de la xarxa a pagar una despesa extra pel subministrament de l'electricitat.

Amb els càlculs i les dades donades de la Taula 6.13 i la Taula 6.14 es pot afirmar que cada any s'està pagant prop de 3.100€ per un consum de reactiva que segurament es podria evitar fàcilment amb la connexió de l'equip a la xarxa, i aquest cop s'està parlant sobre una magnitud considerable.

6.2.2. Amb prototip mitigador

Un cop realitzat l'anàlisi previ, es disposa a simular la mateixa xarxa, però aquest cop amb el controlador connectat a ella per veure si és capaç de reduir els problemes identificats anteriorment.

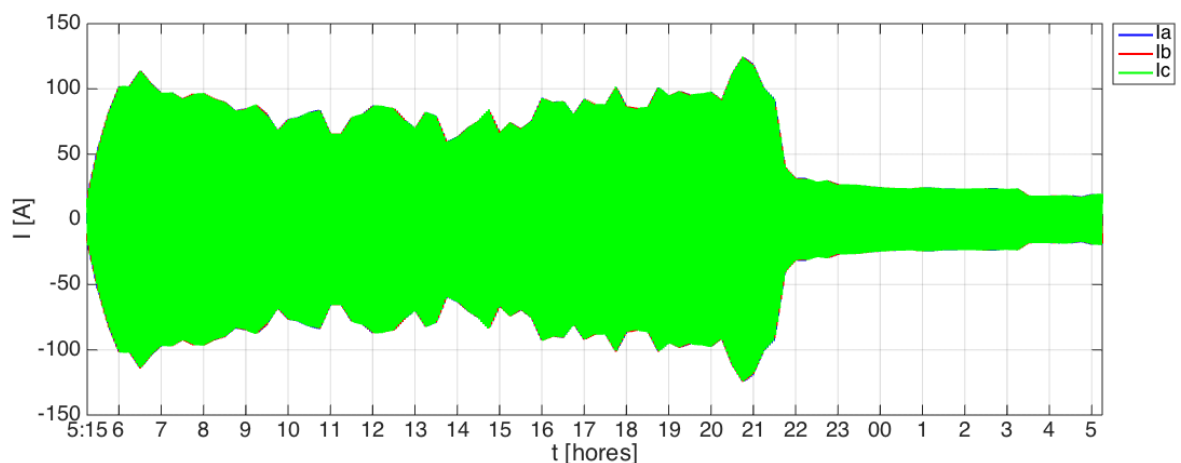


Figura 6.17 Sistema trifàsic dels corrents equilibrats gràcies al prototip connectat a la xarxa

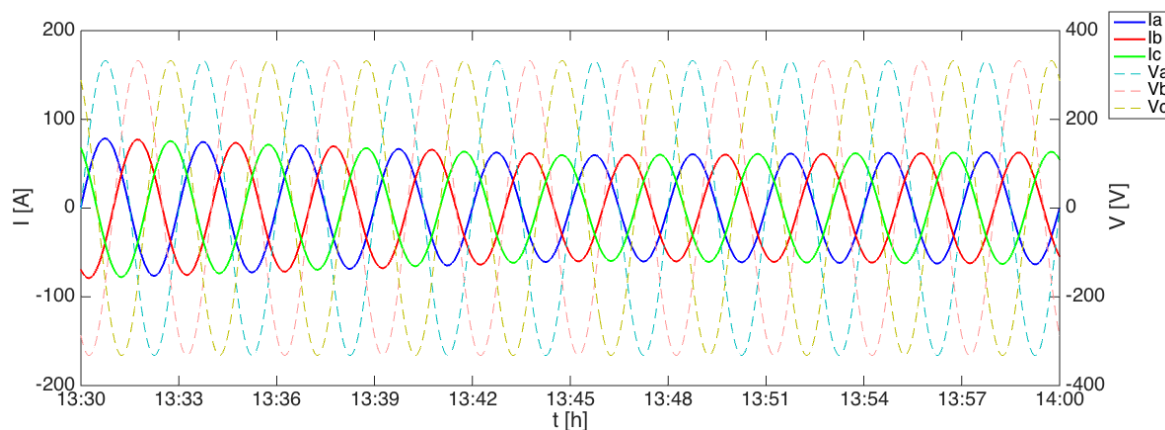


Figura 6.18 Sistema trifàsic de tensions i corrents equilibrats en el tram de temps amb més desequilibris

	Ia [A]	Ib [A]	Ic [A]	Mitjana [A]
Valor eficaç	46,42	46,57	46,39	46,46

Taula 6.15 Mitjanes quadràtiques i mitjana aritmètica dels corrents equilibrats en el tram amb més desequilibri

$$\% \text{desequilibri de corrent} = 0,24\% \quad (16)$$

Mostra temporal	Desequilibris sense controlador [%]	Desequilibris amb controlador [%]	Reducció de desequilibris [%]
Màxim desequilibri	17,9	0,24	98,66

Taula 6.16 Recull dels desequilibris sense i amb equip i la reducció de desequilibris obtinguda

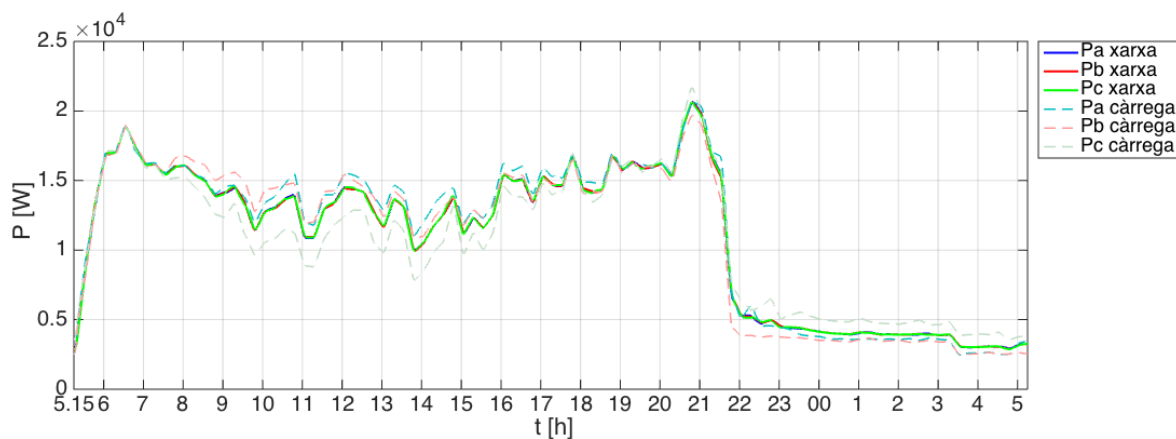


Figura 6.19 Potències actives de cada fase vistes des de la xarxa i la càrrega

L'equip electrònic també ha funcionat per aquesta xarxa i amb grans resultat ja que en el sistema de corrents redueix el percentatge de desequilibri amb més del 98% com es comprova en la Taula 6.15 i en la Taula 6.16. També les potències s'equilibren més del que ja ho estaven com es pot llegir en la Figura 6.19.

Potència reactiva

Pel que fa a la potència reactiva es seguirà el mateix esquema del punt 6.1.2 i es dibuixarà per cada fase la potència de la xarxa i la potència que està consumint la càrrega (que és la mateixa que la de la xarxa quan no hi està actuant el prototip) per veure si s'ha reduït:

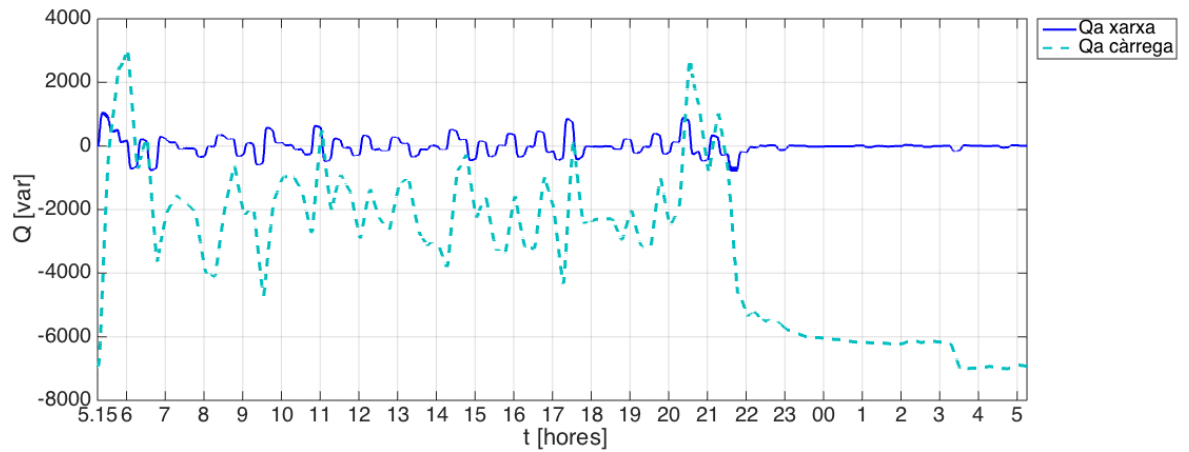


Figura 6.20 Potència reactiva de la fase a vista des de la xarxa i la càrrega

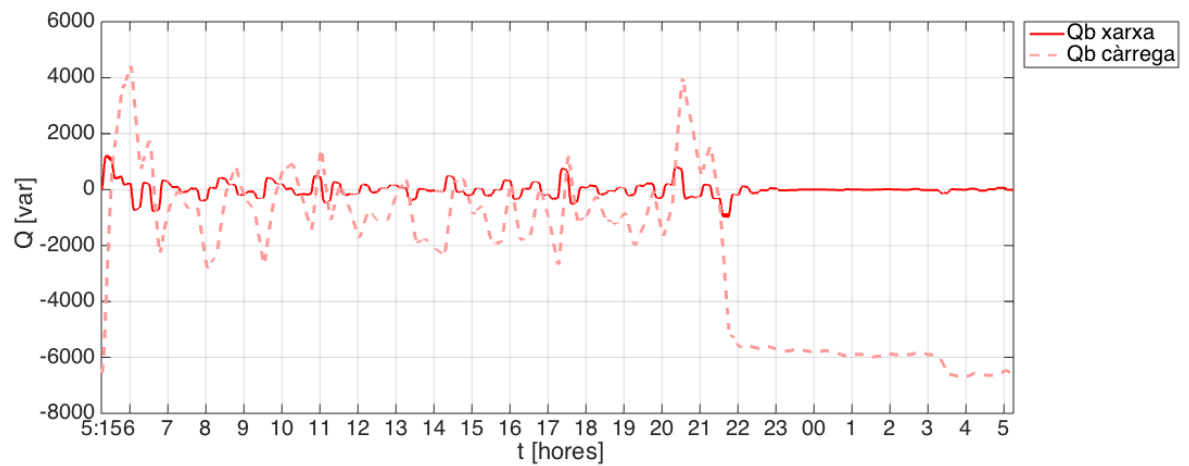


Figura 6.21 Potència reactiva de la fase b vista des de la xarxa i la càrrega

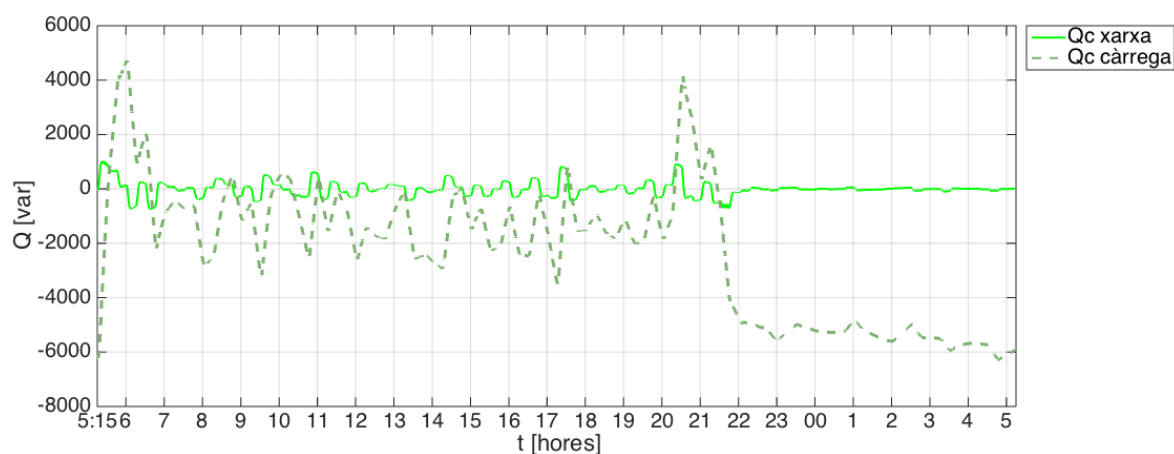


Figura 6.22 Potència reactiva de la fase c vista des de la xarxa i la càrrega

Potència reactiva	Punt de vista	Q Màxima [var]	Q Mínima [var]	Q Mitjana [var]	Reducció de la Q mitjana [%]
Fase a	Q xarxa	1077	-809,1	-7,311	99,77%
	Q càrrega	3004	-7058	-3.166	
Fase b	Q xarxa	1239	-1005	-7,322	99,67%
	Q càrrega	4426	-6675	-2.249	
Fase c	Q xarxa	1034	-768	-7,881	99,66%
	Q càrrega	4726	-6280	-2.290	

Taula 6.17 Recull de potències reactives les màximes, mínimes i mitjanes de cada fase vistes des de la xarxa o la càrrega amb càlcul de la reducció aconseguida per a la potència mitjana

Potència reactiva	Punt de vista	Q Màxima [var]	Reducció de la Q màxima [%]
Fase a	Q xarxa	1077	64,15%
	Q càrrega	3004	
Fase b	Q xarxa	1239	72,01%
	Q càrrega	4426	
Fase c	Q xarxa	1034	78,12%
	Q càrrega	4726	

Taula 6.18 Càlcul de la reducció de la potència reactiva màxima

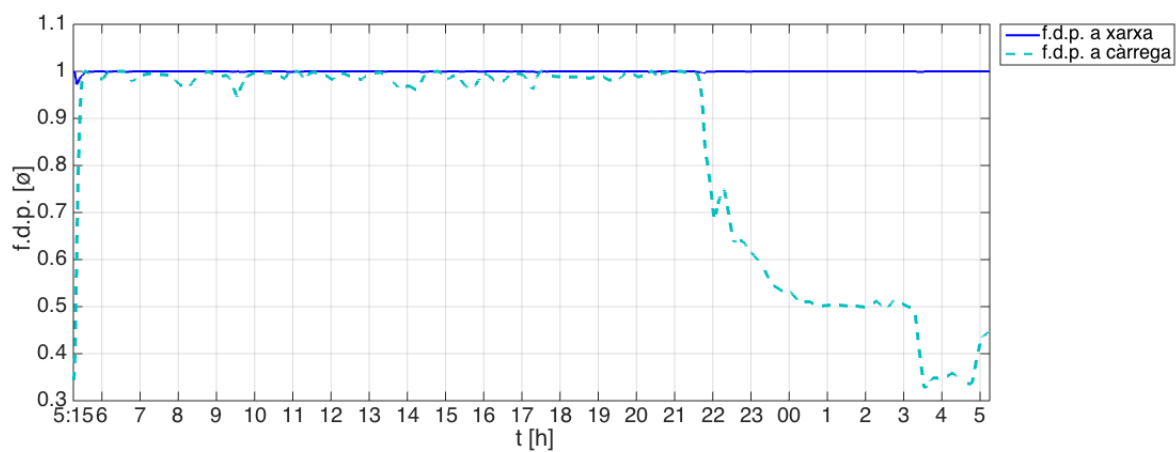


Figura 6.23 f.d.p. de la fase a vista des de la xarxa i la càrrega

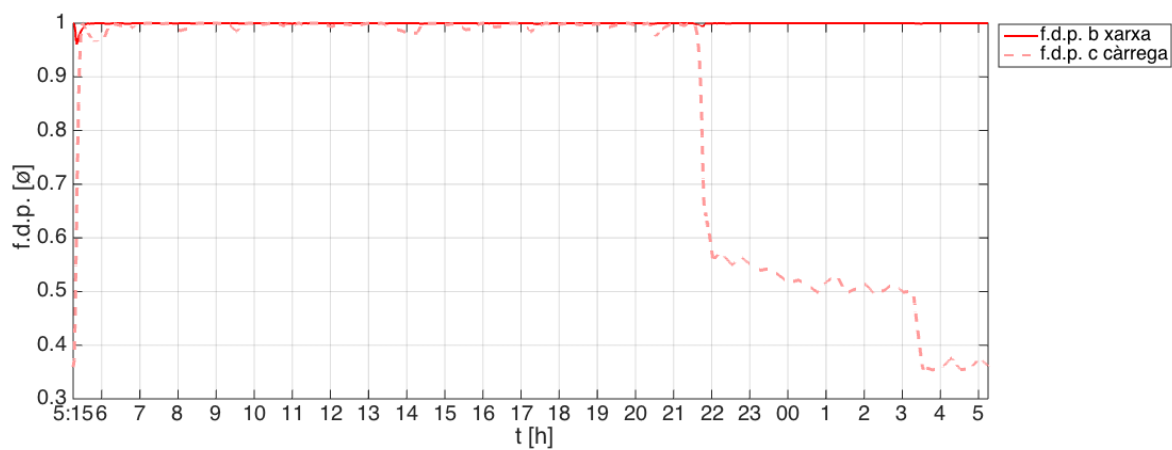


Figura 6.24 f.d.p. de la fase b vista des de la xarxa i la càrrega

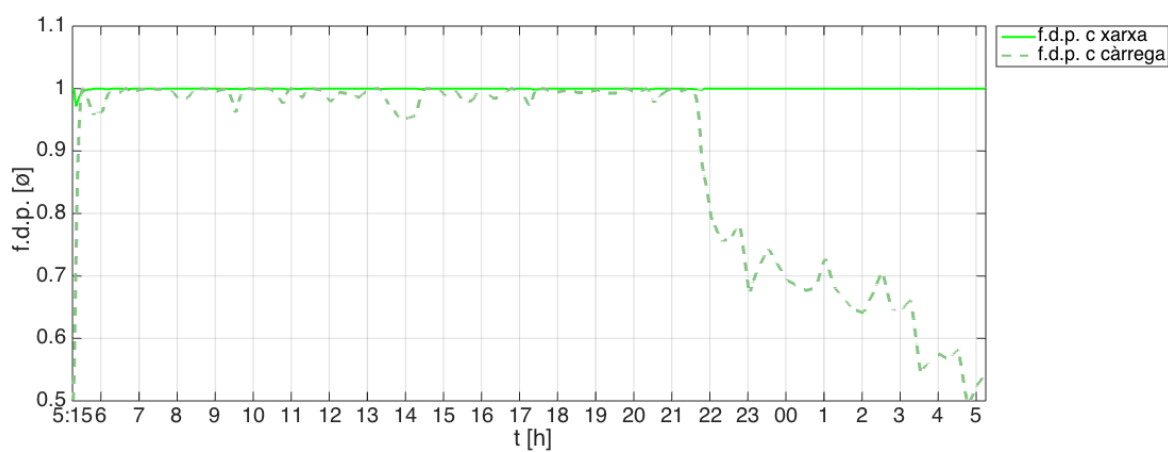


Figura 6.25 f.d.p. de la fase c vista des de la xarxa i la càrrega

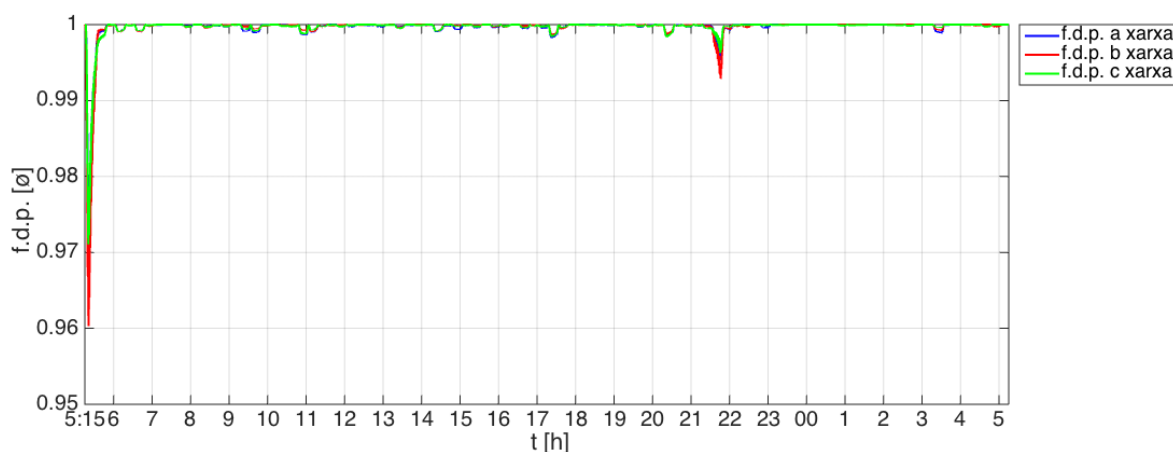


Figura 6.26 f.d.p. de les tres fases vistes des de la xarxa

Despesa a pagar [€]	Fase a [1 dia]	Fase b [1 dia]	Fase c [1 dia]	Tres fases [1 dia]	Mes [30 dies]	Any [365 dies]
Sense controlador	2,99	2,91	2,53	8,43	252,9	3076,96
Amb controlador	0	0	0	0	0	0

Taula 6.19 Comparació de les despeses a pagar per consum de potència reactiva amb o sense prototip

Amb la Figura 6.20, la Figura 6.21 i la Figura 6.22 de les tres fases es poden observar certs comportaments interessants de l'acció del prototip sobre el sistema. Com més abruptes són els canvis de la potència reactiva més li costa obligar a aquesta adoptar un valor de 0, que això és el que li passa al llarg del dia, però en cap moment la potència reactiva de la xarxa és major que la de la càrrega. En canvi, durant la nit (entre les 22 hores i les 5 hores), es pot observar que encara que hi hagi de mitjana molta més potència reactiva que durant el dia, el controlador no té problemes per compensar aquesta potència reactiva, això és gràcies a que el nivell d'aquesta es manté constant en un llarg període de temps. Un altre comportament interessant a assenyalar és que la potència reactiva mínima (potència reactiva capacitiva) de la xarxa, s'hi arriba per culpa del pic màxim de potència reactiva màxima (potència reactiva inductiva) de la càrrega i no quan la potència reactiva capacitiva és mínima a la xarxa.

Segons la Taula 6.17 l'eficiència del controlador amb la potència reactiva mitjana és francament molt alta amb més d'un 99% de reducció d'aquesta. També es pot calcular la reducció per quan la potència reactiva és màxima ja que els dos pics coincideixen en el mateix instant de temps i es pot veure directament l'eficiència del controlador per casos extrems com es pot veure en la Taula 6.18. En canvi per la potència mínima no es pot

calcula perquè els pics mínims de la xarxa i la càrrega es produeixen en diferents instants de temps degut a que el controlador té algun tram de transitorietat per compensar la potència produïda a la càrrega. Es pot afirmar que com més alt és el pic de la potència reactiva més eficient es torna el controlador i es produeix un percentatge de reducció més elevat.

Segons la Figura 6.23, la Figura 6.24 i la Figura 6.25 el controlador funciona quasi a la perfecció; en les tres fases gairebé es manté amb un valor de f.d.p. de 1 el que indicaria que tota la potència aparent és potència activa. En aquí no cal fer una taula de les despeses que s'haurien de pagar per excés de consum de potència reactiva, ja que en cap moment el factor de potència és menor de 0,95 en cap de les tres fases com es pot observar de més a prop en la Figura 6.26. Així es pot afirmar que amb el controlador connectat a la xarxa es deixa de pagar la despesa anual de consum de potència reactiva.

7. PLANIFICACIÓ

El present projecte es va iniciar a mitjans de febrer de 2018 i va tenir una durada de gairebé cinc mesos quan la seva fi va coincidir amb la seva data d'entrega al 21 de juny de 2018. En aquest període de temps es va seguir una planificació en el treball pràctic i teòric que es pot agrupar en diferents punts:

- Reunió amb els tutors: definició dels objectius del projecte.
- Elecció de les eines per a la part pràctica: decisió de com es portarà a terme la part pràctica del projecte.
- Aprenentatge i creació dels models a simular: aprendre com interactuar amb el software amb que es realitza el projecte i dissenyar el model amb què es treballa.
- Tractament de dades: filtrar les dades cedides, escollir-ne les que se'n trauran un ús i rebutjar la resta.
- Simulació: Temps necessari per calcular els casos d'estudi i tractament dels resultats per la seva presentació clara i neta a la memòria.
- Redacció de la memòria

Aquestes activitats no s'han dut a terme per passos i ordre, sinó que més aviat han estat paral·leles unes amb les altres. Per tenir una millor visió i consciència del temps dedicat en cada punt, s'opta per dibuixar un gràfic de Gantt que és una eina de planificació de projectes on es presenten totes les activitats que s'han realitzat i quan s'han realitzat.

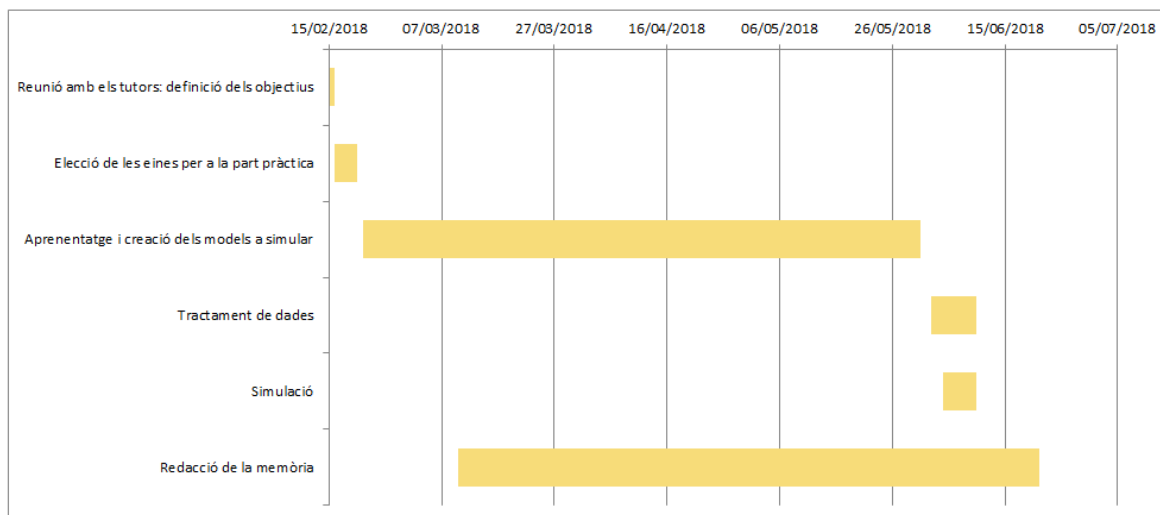


Figura 7.1 Gràfic de Gantt sobre la planificació de les fases del treball

8. PRESSUPOST

En aquest apartat es busca fer un càlcul aproximat i justificat del cost del present projecte.

8.1. Recursos humans

El projecte ha estat elaborat per tres persones, un enginyer júnior que ha portat a terme la part central del projecte, i dos enginyers que han estat tutors del projecte assistint a l'enginyer júnior. L'enginyer júnior cobra per a la seva feina 35€/hora i els enginyers cobren 60€/hora. A partir de les fases realitzades al projecte i les hores invertides en cadascuna d'elles, es calcula el cost de recursos humans:

Fase del projecte	Cost [€/hora]	Hores emprades	Cost total [€]
Definició dels objectius del projecte	35	5	175
Elecció de les eines per a la part pràctica	35	10	350
Aprenentatge i creació dels models a simular	35	300	10.500
Tractament de dades	35	2	70
Simulació	35	10	350
Redacció de la memòria	35	90	3.150
Reunió amb els tutors	35/60	35	3.325
Total cost de recursos humans			17.920

Taula 8.1 Cost dels recursos humans a partir de la persona que ha realitzat l'activitat i les hores que hi ha dedicat

El cost total en personal del projecte és de 17.920€.

8.2. Recursos materials i energètics

El material emprat en aquest projecte es pot dividir en dos tipus: el material tangencial (portàtil i papers) i material no tangencial (les llicències dels programes informàtics utilitzats). El total de tots ells és:

Material	Cost [€/unitat]	Unitats	Cost total [€]
Portàtil	900	1	900
Full de paper	0,0085	30	0,26
Llicència MATLAB 2014	149,95	1	149,95
Llicència Microsoft Office	119	1	119
Cost total del material			1.169,21

Taula 8.2 Cost dels recursos materials a partir del nombre de les unitats emprades i el seu cost per unitat

El cost total en material del projecte és de 1.169,21€.

Per a calcular el cost de l'energia elèctrica utilitzada s'ha fet servir el preu mitjà de l'any 2016, 39,67 €/MWh [22].

Element de consum	Potència [W]	Temps de consum [h]	Consum energètic [MWh]	Cost [€/MWh]	Cost energia [€]
Portàtil	250	412	0,103	39,67	4,09
Il·luminació	100	412	0,0412	39,67	1,63
Cost total de l'energia					5,72

Taula 8.3 Cost dels recursos energètics a partir del consum energètic i el cost d'aquest consum

El cost total en l'energia consumida és de 5,72 €.

8.3. Cost final del projecte

Amb tots els costos calculats es fa un sumatori d'ells i se'ls hi aplica l'impost sobre el valor afegit, conegut també com a IVA.

Concepte	Cost total [€]
Recursos humans	17.920
Recursos materials	1.169,21
Recursos energètics	5,72
Preu final	19.094,93
IVA (21%)	4.009,94
Preu final amb IVA inclòs	23.104,87

Taula 8.4 Cost final del projecte per cada recurs utilitzat i amb l'IVA inclòs

El pressupost total del projecte amb IVA inclòs és de 23.104,87€.

9. IMPACTE AMBIENTAL

Per a l'elaboració del projecte l'impacte ambiental no ha estat gaire significatiu, però és important fer-ne un anàlisi per veure si en algun moment s'hagués pogut reduir per no cometre els mateixos errors en un futur.

Els recursos principals que han estat consumits són l'electricitat i el paper. L'impacte de paper es podria comptabilitzar amb el nombre d'arbres necessaris per produir el paper utilitzat per realitzar el projecte. Per elaborar el projecte s'han utilitzat prop de 30 folis de paper, més el que es consumirà per a la impressió de la memòria que serà de prop de 80 folis dividit entre dos perquè s'imprimirà a doble cara, es consumirà un total de 70 folis de paper en total. Un arbre serveix per produir 8.000 fulls de paper DIN A4 [23]. Per tant l'impacte del paper consumit és de:

$$70 \text{ fulls} \cdot \frac{1 \text{ arbre}}{8.000 \text{ fulls}} = 0,00875 \text{ arbres} \quad (16)$$

Pel que fa l'electricitat, a partir del consum realitzat es pot calcular el g de CO₂ que es necessiten de mitjana per produir l'energia. L'equivalent entre els kWh i els g de CO₂ és de 392 g CO₂/kWh [24].

Element de consum	Potència [W]	Temps de consum [h]	Consum energètic [kWh]	Emissions CO ₂ [g CO ₂ /kWh]	Emissions [kg CO ₂]
Portàtil	250	412	103	392	403,8
Il·luminació	100	412	41,2	392	161,5
Emissions totals					565,3

Taula 9.1 Emissions de CO₂ emeses a partir de l'energia consumida

Així doncs l'impacte total del projecte és una producció total de 565,3 kg de CO₂, un gas contaminant per a l'atmosfera, i el consum total de 0,00875 arbres.

10. CONCLUSIONS

L'objectiu principal del treball era modelar una eina que permetés la anàlisi de les xarxes elèctriques que s'ha aconseguit a mesura que s'ha anat definint al llarg de la memòria. A més a més, l'altre objectiu que anava implícit amb el principal era el modelat una solució específica per testejar l'eina i valorar la seva eficiència.

Pel que fa l'eina per a la simulació es pot afirmar que s'ha assolit el que es pretenia que és que fos funcional però per altra banda s'ha hagut de limitar en un aspecte que és que la xarxa transmet el sistema de tensions trifàsiques de forma ideal per el temps que es requeria de simulació. Com a acció futura es podria optimitzar l'eina i realitzar un estudi que permeti portar la xarxa a un nivell més real modelant un centre de transformació que desequilibri el sistema de tensions.

La solució concreta per mitigar els problemes relacionats amb la qualitat de subministrament de la xarxa elèctrica ha estat la implementació d'un prototip d'una part d'un equip que està format per elements de l'electrònica de potència. Amb les missions de reduir els desequilibris i els consums de potència reactiva s'ha testejat si l'equip era eficient amb l'eina dissenyada amb l'ajuda de xarxes reals.

Les conclusions que s'extreuen dels casos d'estudi sobre el prototip en relació a la reducció de desequilibris és que té una eficiència molt elevada ja que amb l'estudi dels trams on hi havia més desequilibri el tant per cent de reducció d'aquest era de més del 98%. El mateix es pot dir sobre la potència reactiva que té unes reduccions mitjanes de més del 90%, però en aquest cas s'ha pogut comprovar que en casos més extrems se li redueix considerablement fins arribar a unes reduccions del 65%. Amb els casos d'estudi també s'ha pogut comprovar que l'equip treballa millor quan no hi ha canvis bruscos a les fases i que en moments crítics pot necessitar un temps de transitorietat notori per mitigar el problema.

Com a possibles estudis de futur es poden seguir diferents camins. Es podria simular el prototip amb l'eina de simulació millorada i treure'n resultats més acurats a la realitat. També es podria ampliar l'abast del projecte i implementar el prototip de tot l'equip controlador que a part dels problemes mencionat, redueix els harmònics de la xarxa.

Les competències obtingudes amb el projecte i que han permès l'assoliment d'objectius més complementaris del treball són la cerca, síntesis i expressió de la informació necessària per a la realització del treball. Ampliació dels coneixements sobre les xarxes elèctriques i l'aprenentatge de l'ús del programari de SIMULINK que ha permès la assoliment de la part pràctica del treball.

11. AGRAÏMENTS

Per concloure el treball es donen els agraïments pertinents a aquelles persones que l'han fet possible. Primer de tot agrair als dos directors del treball Francesc Girbau i Daniel Montesinos per donar-me la oportunitat de treballar en aquest projecte i ser-hi sempre que s'han necessitat. Agrair també al professor de l'escola Daniel Heredero per solucionar els dubtes que es tenien sobre el prototip mitigador, sense la seva ajuda sense dubte hagués estat molt més feixuga la feina. Agrair també a CITCEA i al seu personal ja que m'han obert les seves portes i m'han proporcionat les dades de les xarxes simulades.

També vull donar un especial agraïment a tots aquells amics i amigues que no han tingut una repercussió directe en el treball però sí en la meva vida i que molt possiblement sense ells no seria qui sóc ni estaria on sóc avui.

Finalment, però no menys important, agrair tot el suport moral rebut per part de la meva família que mai n'ha faltat i en particular agrair i fer una petita menció a la meva àvia Montserrat ja que va passar a millor vida durant la realització d'aquest treball.

12. Bibliografia

- [1] «La red eléctrica | ENDESA EDUCA,» 10 03 2018. [En línia]. Available: https://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/el-transporte-de-electricidad/xv.-la-red-electrica.
- [2] «Conceptos Básicos de Redes Eléctricas – ¿Qué necesito saber? | Temas Tecnológicos de Interés,» [En línia]. Available: <https://www.temastecnologicos.com/redes-electricas/>. [Últim accés: 10 03 2018].
- [3] «Transport i transformació,» [En línia]. Available: <http://tecno.upc.edu/bt/Tema-19/TransportTransformacio.htm>. [Últim accés: 10 03 2018].
- [4] M. B. Carreras, Electrotecnia, Editex, 2017, p. 23 y 24.
- [5] A. C. Germán Santamaría, Electrotecnia. Electricidad y electrónica, Editex, 2009, p. 162 i 163.
- [6] J. R. R. Polo, Circuitos eléctricos monofásicos y trifásicos, Lleida: Edicions de la Universitat de Lleida, 2000, pp. 85-90.
- [7] S. G. Garrido, «Por qué se distribuye corriente trifásica,» [En línia]. [Últim accés: 1 05 2018].
- [8] J. C. Aladro, Análisis de sistemas de energía eléctrica, Oviedo: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo, 2002, p. 2.
- [9] «Diferencias entre $\cos\phi$ y Factor de Potencia,» [En línia]. Available: <http://quintoarmonico.es/2008/07/17/diferencias-entre-cos%CF%86-y-factor-de-potencia/>. [Últim accés: 30 05 2018].
- [10] M. D. C. Y. TECNOLOGÍA, «REGLAMENTO ELECTROTÉCNICO PARA BAJA TENSIÓN E INSTRUCCIONES TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS (ITC),» [En línia]. Available: <https://instalacionesyeficienciaenergetica.com/normativa/normativa-electrica/reglamento-baja-tension.pdf>. [Últim accés: 10 05 2018].
- [11] J. F. Moreno, Teoría de circuitos. Teoría y problemas resueltos, Ediciones Paraninfo,

S.A, 2011, p. 298.

- [12] H. Mata, «Consecuencia del desbalance del voltaje en motores eléctricos,» [En línea]. Available: <http://renamecr.com/blog/index.php/2017/06/26/consecuencia-del-desbalance-del-voltaje-en-motores-electricos/>. [Últim accés: 15 05 2018].
- [13] «Aplicaciones de las bobinas electromagnéticas,» [En línea]. Available: <http://www.elementsmagneticos.com/Aplicaciones-de-las-bobinas>. [Últim accés: 02 06 2018].
- [14] I. A. Detomasi, «Compensación de Energía Reactiva y Efectos en la Calidad de la Potencia,» [En línea]. Available: <http://adaptativesolutions.com/wp-content/uploads/2012/10/Reactiva-Efectos-Adversos-de-la-Compensacion.pdf>. [Últim accés: 05 06 2018].
- [15] t. y. c. Ministerio de industria, «Orden ITC/3519/2009,» [En línea]. Available: <http://www.boe.es/boe/dias/2009/12/31/pdfs/BOE-A-2009-21173.pdf>. [Últim accés: 28 05 2018].
- [16] L. S. F. C. F. J. Oriol Boix, Tecnología eléctrica, Barcelona: Editorial Técnica, 2009, pp. 250-300.
- [17] T. H. Joseph Seymour, «Los siete tipos de problemas en el suministro eléctrico,» [En línea]. Available: http://www.apc.com/salestools/VAVR-5WKLPK/VAVR-5WKLPK_R0_LS.pdf. [Últim accés: 04 04 2018].
- [18] «Desequilibrio de tensión - Constructor Eléctrico,» 2014. [En línea]. Available: <https://constructorelectrico.com/desequilibrio-de-tension/>. [Últim accés: 20 05 2018].
- [19] «Compensación de reactiva,» RTR energia, [En línea]. Available: http://www.rtrenergia.es/downloads/reactiva_2012.pdf. [Últim accés: 03 06 2018].
- [20] F. Miyara, «PLL LAZOS DE FIJACIÓN DE FASE,» [En línea]. Available: <https://www.fceia.unr.edu.ar/enica3/pll.pdf>. [Últim accés: 30 04 2018].
- [21] J. P. J. B. J. I. C. R. P. B. D. B. Pedro Rodríguez, «Decoupled Double Synchronous Reference Frame PLL for Power Converters Control,» Barcelona, 2007.
- [22] «Informe de precios 2016,» [En línea]. Available: http://www.omie.es/files/Informe_Precios_ESP_Navegable.pdf. [Últim accés: 13 06 2018].

2018].

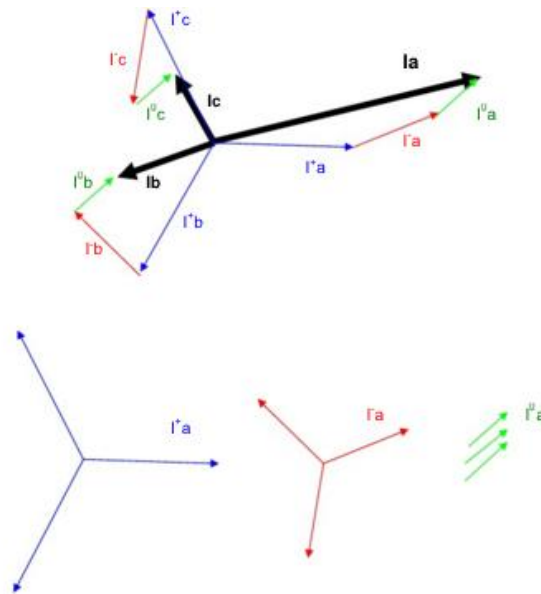
- [23] «¡Todos somos responsables!», gasNatural fenosa, [En línia]. Available: <http://www.gasnaturalfenosa.com.ar/servlet/ficheros/1297143965614/papel.pdf>. [Últim accés: 13 06 2018].
- [24] «GUIA PRÀCTICA PER AL CàLCUL D'EMISSIONS DE GASOS AMB EFECTE D'HIVERNACLE (GEH),» Oficina catalana del canvi climàtic, [En línia]. Available: http://canviclimatic.gencat.cat/web/.content/home/reduex_emissions/Com_calcular_emissions_GEH/guia_de_calcul_demissions_de_co2/18_Guia-practica-calcul-emissions_sense-canvis_CA.pdf. [Últim accés: 12 06 2018].
- [25] «Componentes Simétricas,» [En línia]. Available: <https://www.iit.comillas.edu/pablof/asee/cc/componentes%20simetricas.pdf>. [Últim accés: 06 04 2018].
- [26] «Symmetrical-Components Transform,» Mathworks, [En línia]. Available: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ref/symmetricalcomponentstransform.html>. [Últim accés: 15 04 2018].
- [27] «Park, Inverse Park and Clarke, Inverse Clarke,» [En línia]. Available: https://www.microsemi.com/document-portal/doc_view/132799-park-inverse-park-and-clark-inverse-clark-transformations-mss-software-implementation-user-guide. [Últim accés: 15 04 2018].
- [28] «Field Oriented Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor using a DSP,» [En línia]. Available: <http://www.rroij.com/open-access/field-oriented-control-of-a-permanentmagnet-synchronous-motor-using-a-dsp.php?aid=43937>. [Últim accés: 20 06 2018].
- [29] P. Q. Hurtado, «Compensación de desequilibrios en redes eléctricas mediante convertidores electrónicos de potencia y redes de secuencia,» [En línia]. Available: http://oa.upm.es/45247/1/TFG_PILAR_QUINTANA_HURTADO.pdf. [Últim accés: 02 05 2018].

13. ANNEX

13.1. Teorema de les components simètriques i transformacions vectorials Clarke i Park

Teorema de les components simètriques

El teorema de les components simètriques o també conegut com el teorema de Fortescue és utilitzat en la anàlisi de sistemes de elèctrics desequilibrats ja que afirma que a partir d'un sistema desequilibrat de n fases es pot dividir i convertir-lo en n sistemes equilibrats que sumats formen el sistema inicial per el principi de superposició. En el cas d'un sistema trifàsic desequilibrat els tres sistemes equilibrats consisteixen: un de seqüència positiva (gira amb el mateix sentit que el sistema desequilibrat), un de seqüència negativa (gira amb el sentit oposat que el sistema desequilibrat) i un sistema de seqüència zero (que consisteixen en tres fasors b un desplaçament de fase zero respecte uns dels altres). Una imatge explicativa del teorema podria ser la següent:



Taula 13.1 Esquema del teorema de les components simètriques [25]

Les matrius i les equacions matemàtiques per obtenir els tres sistemes són [26]:

$$\begin{bmatrix} V_{a+} \\ V_{a-} \\ V_{a0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{b+} \\ V_{b-} \\ V_{b0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a^2 & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{a+} \\ V_{a-} \\ V_{a0} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{c+} \\ V_{c-} \\ V_{c0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & a^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{a+} \\ V_{a-} \\ V_{a0} \end{bmatrix}$$

Clarke i Park

Existeixen diferents eines per treballar amb més facilitat amb els sistemes elèctrics, una d'elles és la transformació vectorial per portar els fasors elèctrics dibuixats a la base tradicional trifàsica a una nova base bifàsica ortogonal [27]. Aquesta transformació es coneix com a la transformació de Clarke i la matriu matemàtica per realitzar-la és:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_\gamma \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}$$

La inversa de la transformada de Clarke per recuperar la base vectorial és:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_\gamma \end{bmatrix}$$

La transformació de Park agafa la transformació de Clarke i li afegeix una rotació a la base amb la mateixa velocitat en que va la xarxa. El sentit d'aquesta rotació és el mateix amb el que giren els vectors de la base trifàsica inicial, que és en sentit antihorari. Cal donar èmfasi que la base de vectors no coincideix amb els fasors, que tenen sentit horari. La raó per la qual es realitza aquest gir és per treballar amb valors constants enlloc d'ones.

Es pot realitzar la transformació de Park a partir de la transformació de Clarke multiplicant-la per la matriu de rotació:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_\gamma \end{bmatrix}$$

La inversa de l'última fórmula seria aplicant la rotació al revés:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_\gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix}$$

També es pot realitzar la transformació directament des de la base trifàsica:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}$$

Segui com sigui, els resultats de les transformacions de Clarke i Park són els següents:

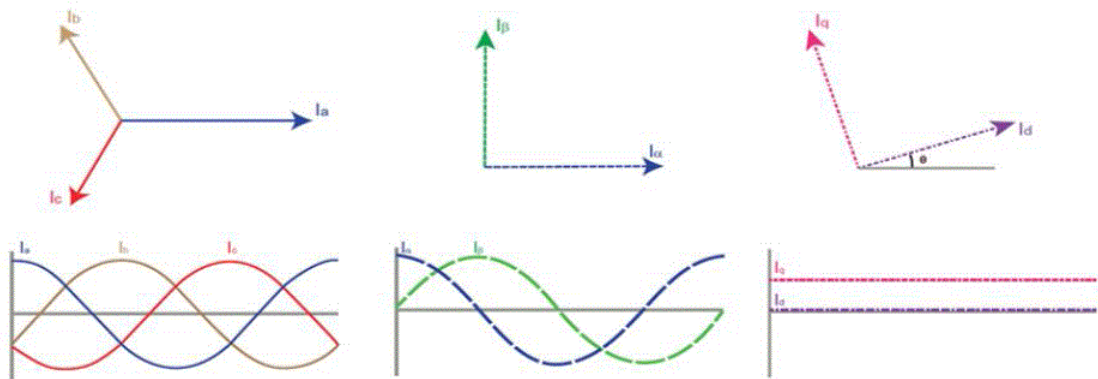


Figura 13.1 Transformació d'un sistema trifàsic (esquerra) a Clarke (mig) i a Park (dreta) [28]

En el prototip hi ha un moment en que s'aplica el teorema de les components simètriques sobre uns corrents transformats amb Clarke que per aconseguir-ho s'han aplicat les següents equacions [29]:

$$\bar{I}_{\alpha\beta}^+ = \frac{1}{2} \cdot \left(\bar{I}_{\alpha\beta}(t) + j \bar{I}_{\alpha\beta} \left(t - \frac{T}{4} \right) \right)$$

$$\bar{I}_{\alpha\beta}^- = \frac{1}{2} \cdot \left(\bar{I}_{\alpha\beta}(t) - j \bar{I}_{\alpha\beta} \left(t - \frac{T}{4} \right) \right)$$

13.2. Disseny de l'eina en SIMULINK

El disseny complet implementat al SIMULINK és el següent on els blocs mantenen els mateixos colors que en el disseny conceptual punt:

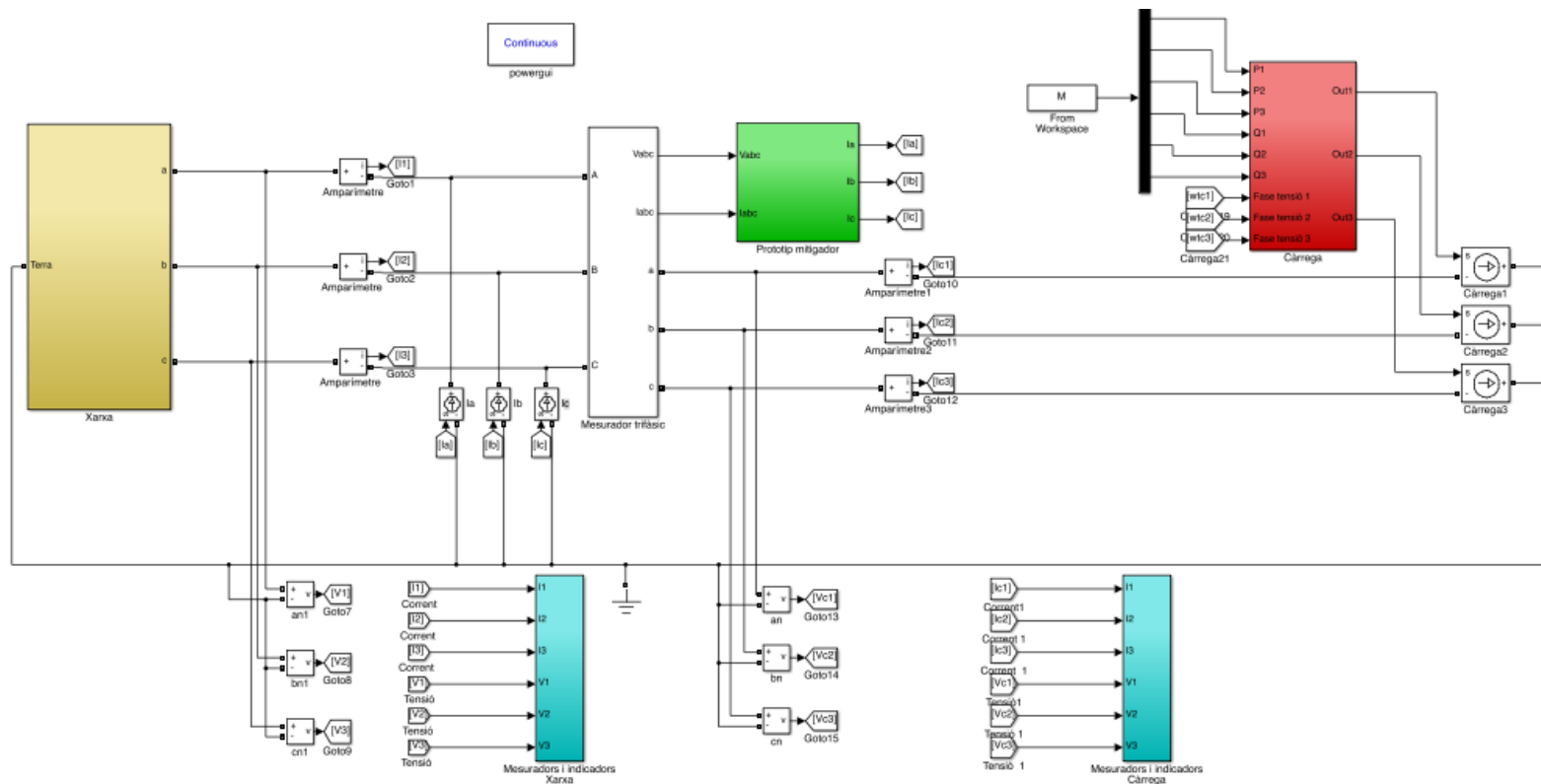


Figura 13.2 Disseny de l'eina implementada amb el SIMULINK

13.2.1. Bloc xarxa

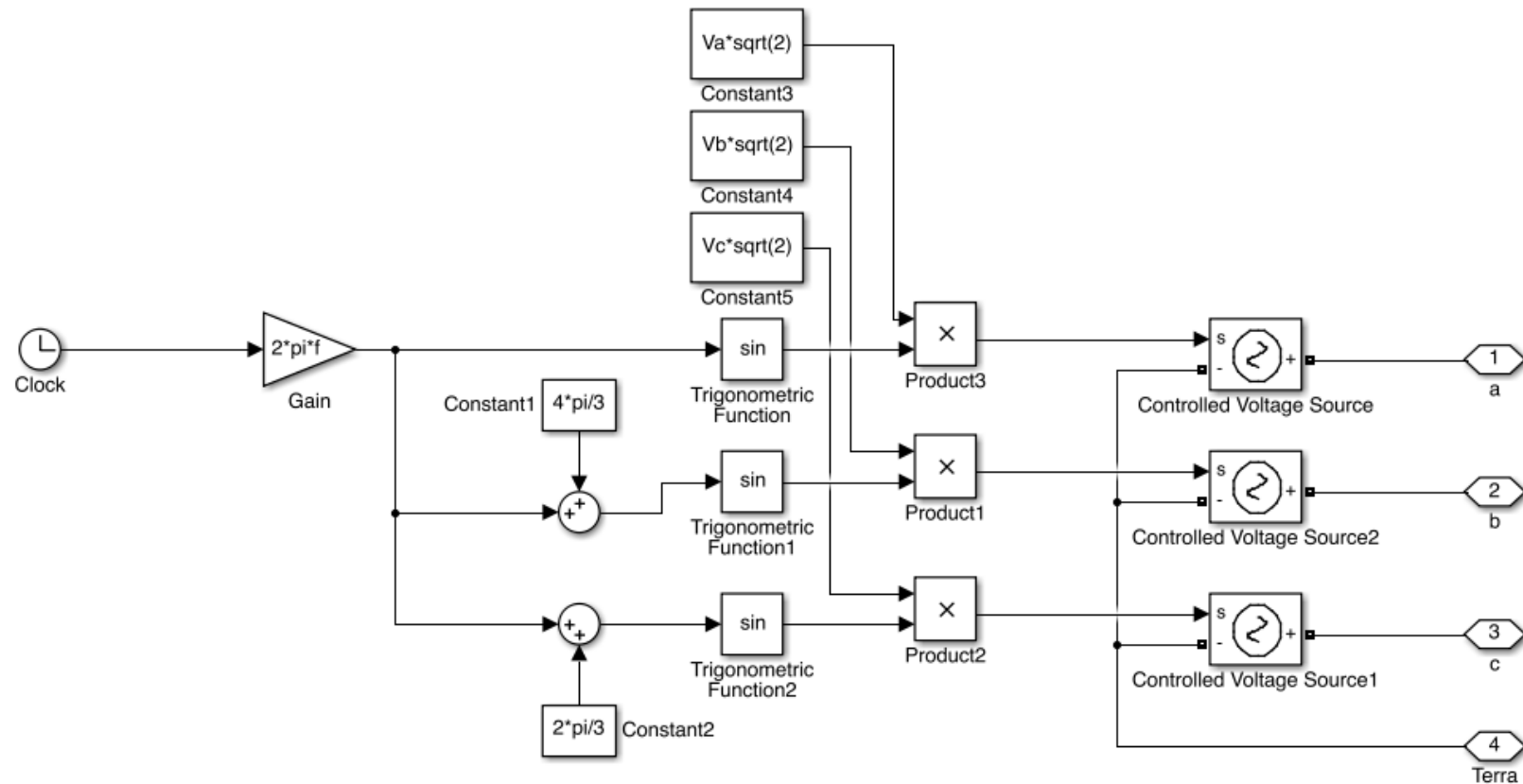


Figura 13.3 Disseny de la xarxa

Dins el bloc de la xarxa es genera a partir del temps de la simulació (clock) que amb ell es calcula la velocitat de les ones que seguidament es desfasen per crear el sistema trifàsic. Les ones que es generen són:

$$v_x = V_x \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi) = V_x \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

Un cop generades es connecten amb una connexió d'estrella on es tenen les tres fases (a, b i c) el neutre que s'envien a la línia.

13.2.2. Bloc càrrega controlada

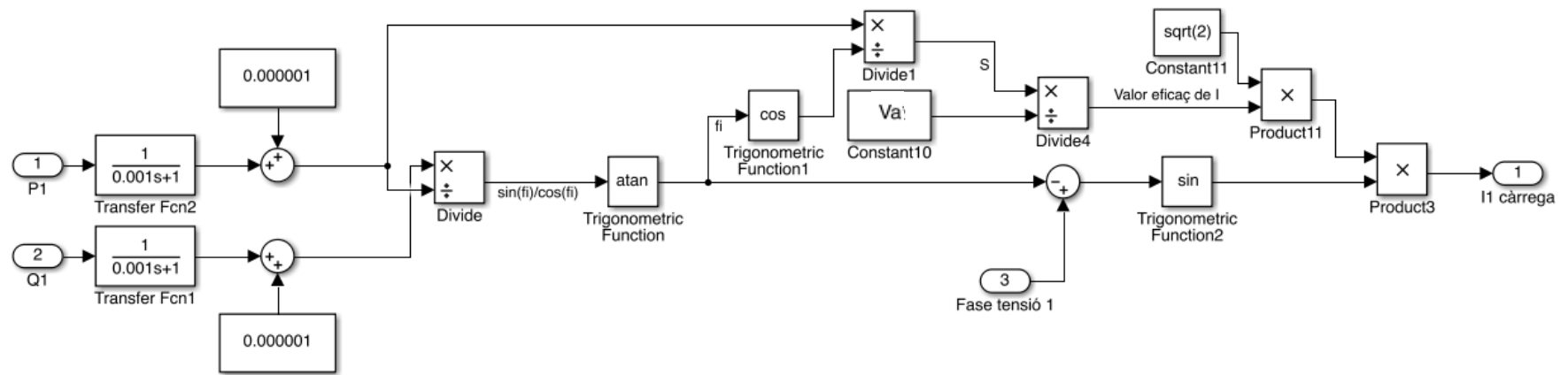


Figura 13.4 Disseny de com es genera el corrent per simular una càrrega a partir de les potències actives i reactives per una fase

Com diu el nom, simula la càrrega del sistema i és controlada en funció de la potència. La Figura 13.4 només es mostra el funcionament d'una fase però el funcionament és el mateix per a les tres.

El bloc consisteix en l'entrada de la potència activa, la potència reactiva, la tensió simple i la fase d'aquesta tensió de cada línia de la xarxa. Es calcula el corrent que hauria de consumir la línia perquè consumís la potència requerida, i aquest corrent és injectat a la línia amb una font de corrent que simula la càrrega.

Per cada fase es segueix la mateixa metodologia: entren la potència activa i reactiva i es divideixen per obtenir el desfasament entre la tensió simple i el corrent en cada moment.

$$\frac{Q_x}{P_x} = \frac{\sin(\varphi_{V_x-I_x})}{\cos(\varphi_{V_x-I_x})} = \tan(\varphi_{V_x-I_x})$$

Un cop es té el desfasament entre la tensió i el corrent es resta de la fase de la tensió per obtenir la fase del corrent elèctric que es vol injectar. Paral·lelament es calcula la potència aparent i juntament amb el valor eficaç de la tensió simple s'obté el valor eficaç de la intensitat. Finalment es multipliquen la intensitat amb el sinus de la seva fase per tenir l'ona a injectar a la xarxa.

$$\varphi_{I_x} = \varphi_{V_x} - \varphi_{V_x-I_x}$$

$$I_x = \frac{S}{V_x} = \frac{\left(\frac{P}{\cos(\varphi_{V_x-I_x})} \right)}{V_x}$$

$$i_x = \sqrt{2} \cdot I_x \cdot \sin(\varphi_{I_x})$$

En aquest bloc se li poden entrar valors de potències constants i variables en el temps. També permet la lectura de documents csv on llegeix el document de la següent manera: la primera columna la interpreta com a dades temporals, i a partir de la segona columna interpreta que cada fase amb dues columnes on la primera conté dades de potència activa i la segona columna conté dades de la potència reactiva.

t	P ₁	Q ₁	P ₂	Q ₂	P ₃	Q ₃
---	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

13.2.3. Bloc mesuradors i indicadors

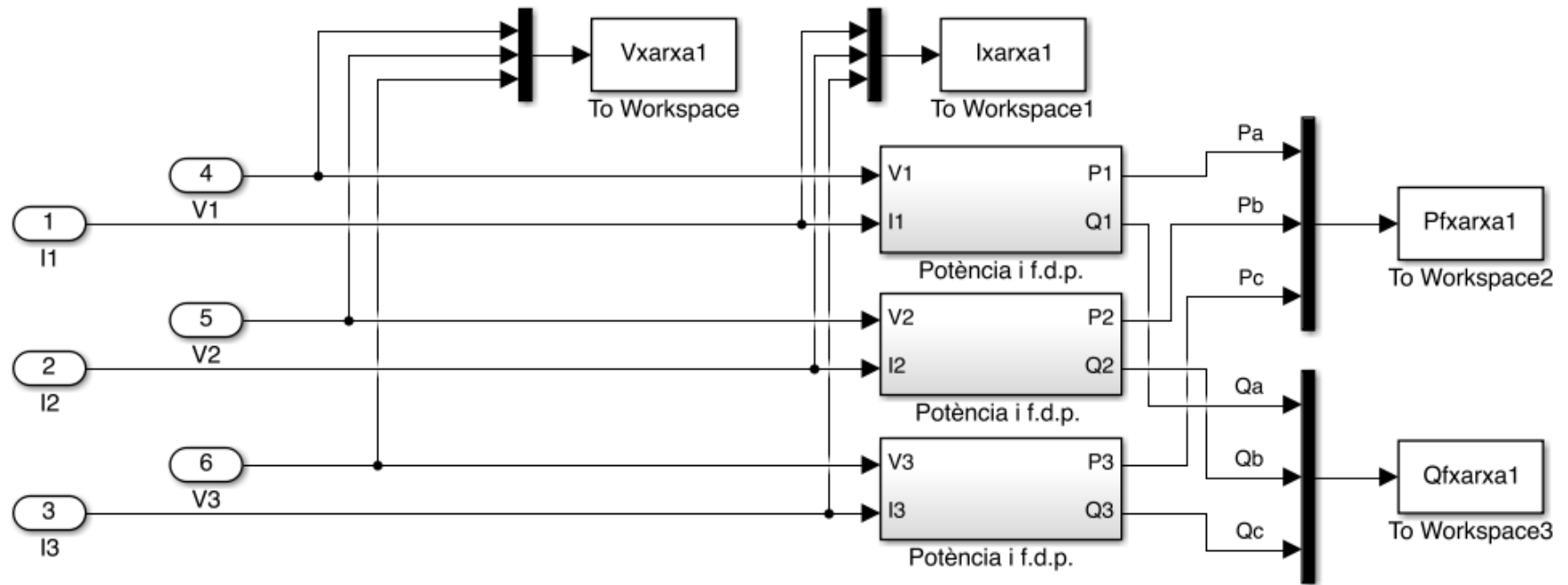


Figura 13.5 Disseny del bloc de mesuradors i indicadors

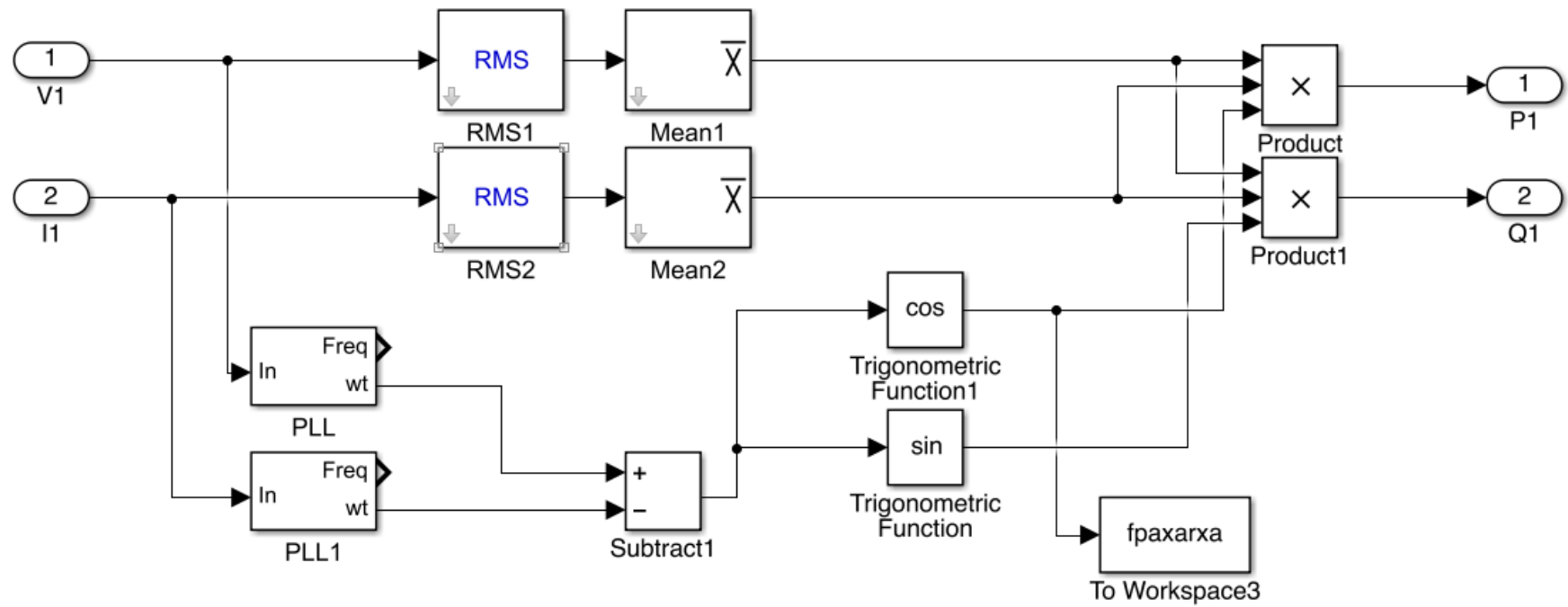


Figura 13.6 Disseny de l'interior del bloc de potència i f.d.p. d'una fase

En aquest bloc té com a entrades senyals de blocs que ja venen dissenyats per realitzar mesures de MATLAB com són els amperímetres i els voltímetres que ens indiquen les mesures dels corrents i les tensions simples de les xarxes.

A partir d'aquestes mesures s'han calculat les mesures de les potències actives i reactives de cada fase. S'han seguit les següents fórmules que defineixen el bloc de la potència i f.d.p:

$$P_x = V_x \cdot I_x \cdot \cos(\varphi_v - \varphi_i)$$

$$Q_x = V_x \cdot I_x \cdot \sin(\varphi_v - \varphi_i)$$

Les fases de les tensions i les intensitat es mesuren amb l'ajuda d'un PLL.

El bloc té la missió d'enviar al workspace de MATLAB les mesures de les variables: intensitats, tensions, factors de potència, potències actives i potències reactives de cada fase i emmagatzemar-les per després poder-les cridar i tractar-les en funció de la necessitat que es requereixi per treure'n unes conclusions

13.3. Disseny prototip mitigador

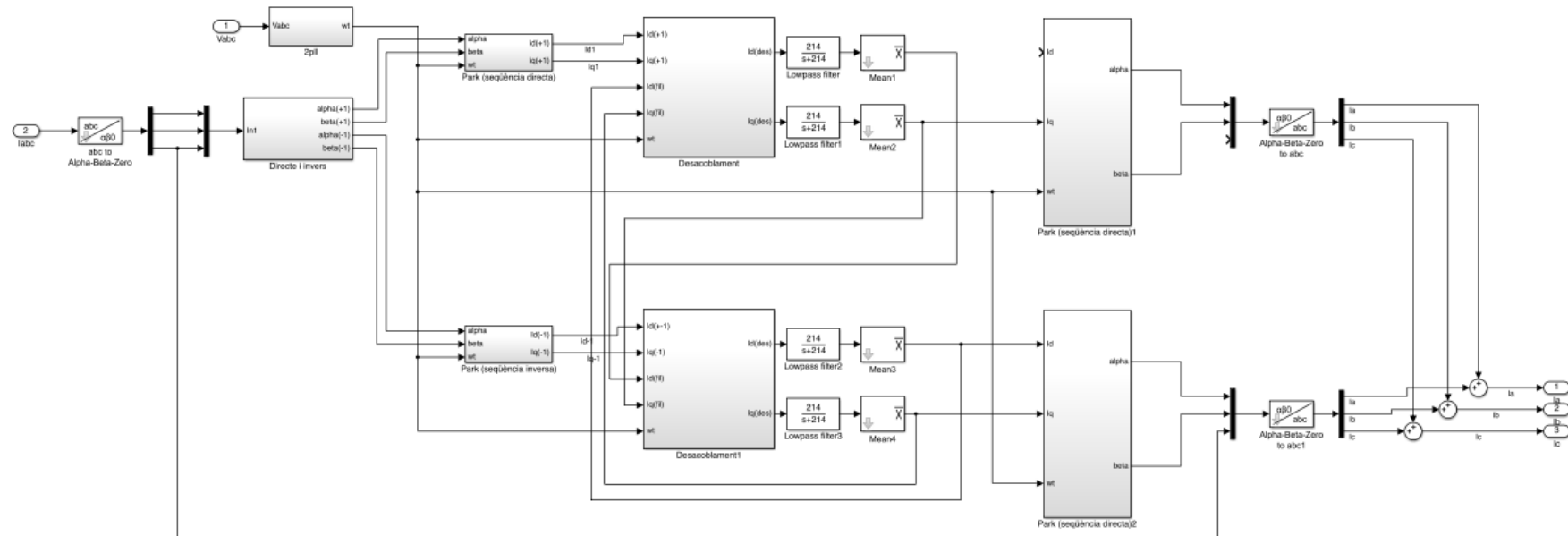


Figura 13.7 Disseny del prototip mitigador de problemes relacionats amb la qualitat del subministrament

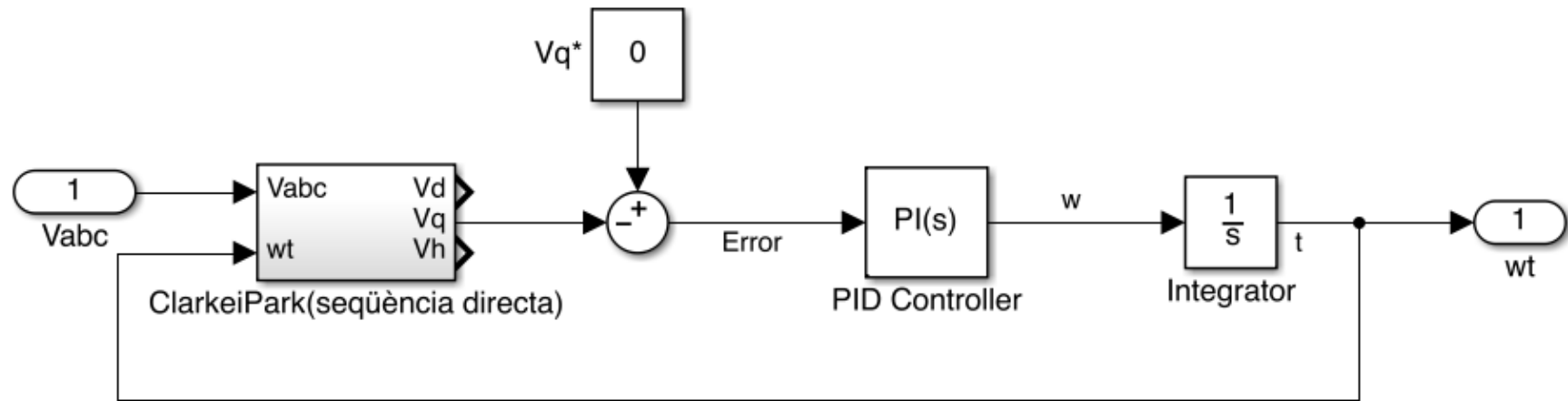


Figura 13.8 PLL per extreure la fase de les tensions de la xarxa

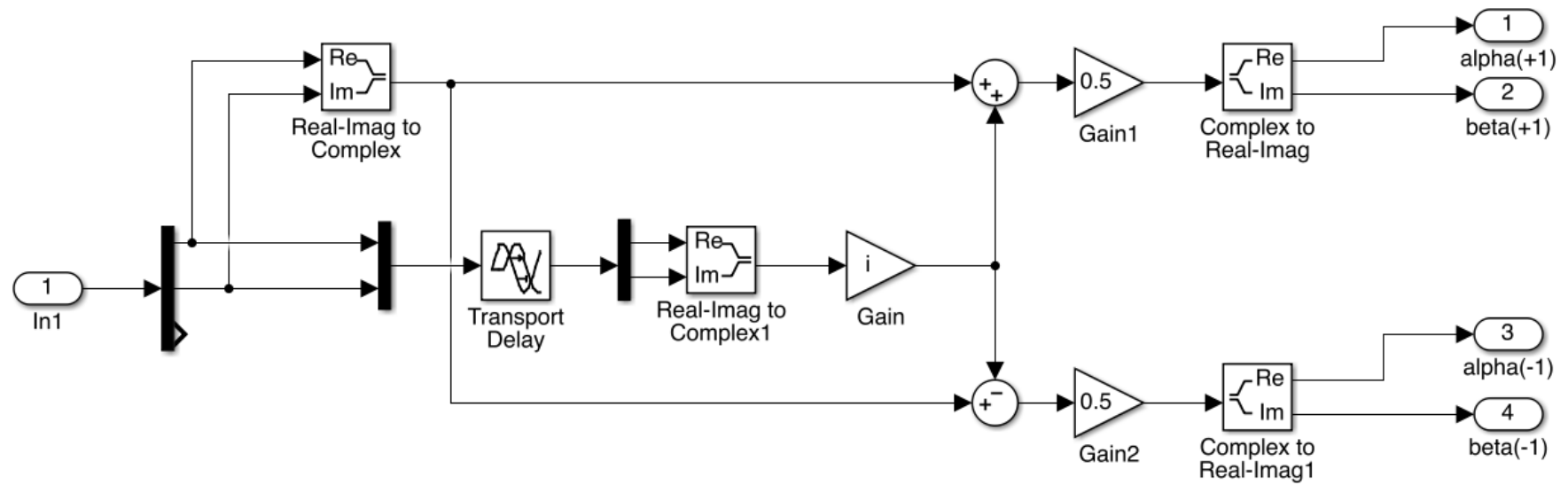
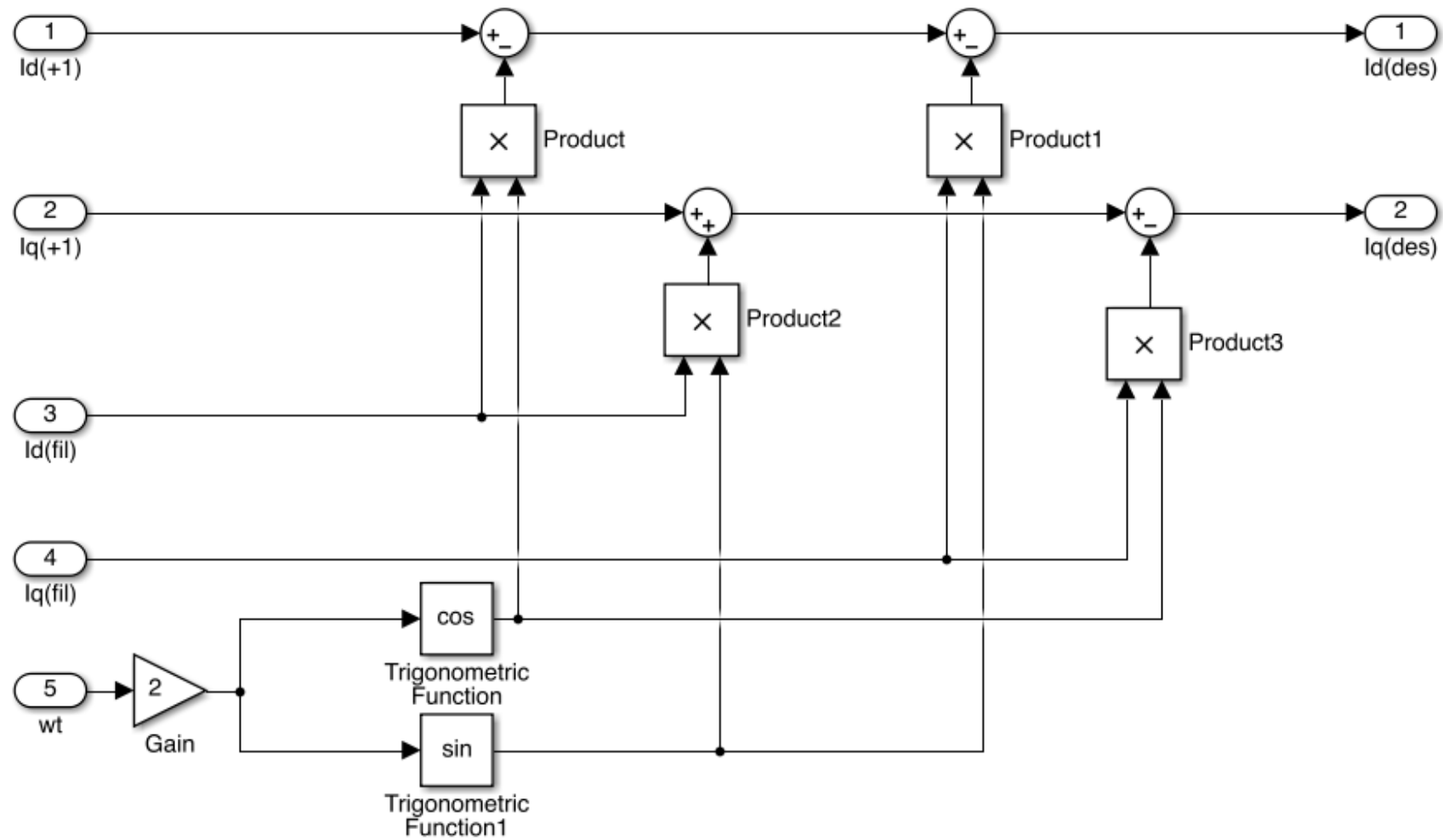


Figura 13.9 Teorema de les components directes aplicades als corrents de la xarxa

*Figura 13.10 Bloc de desacoblament en seqüència directe*

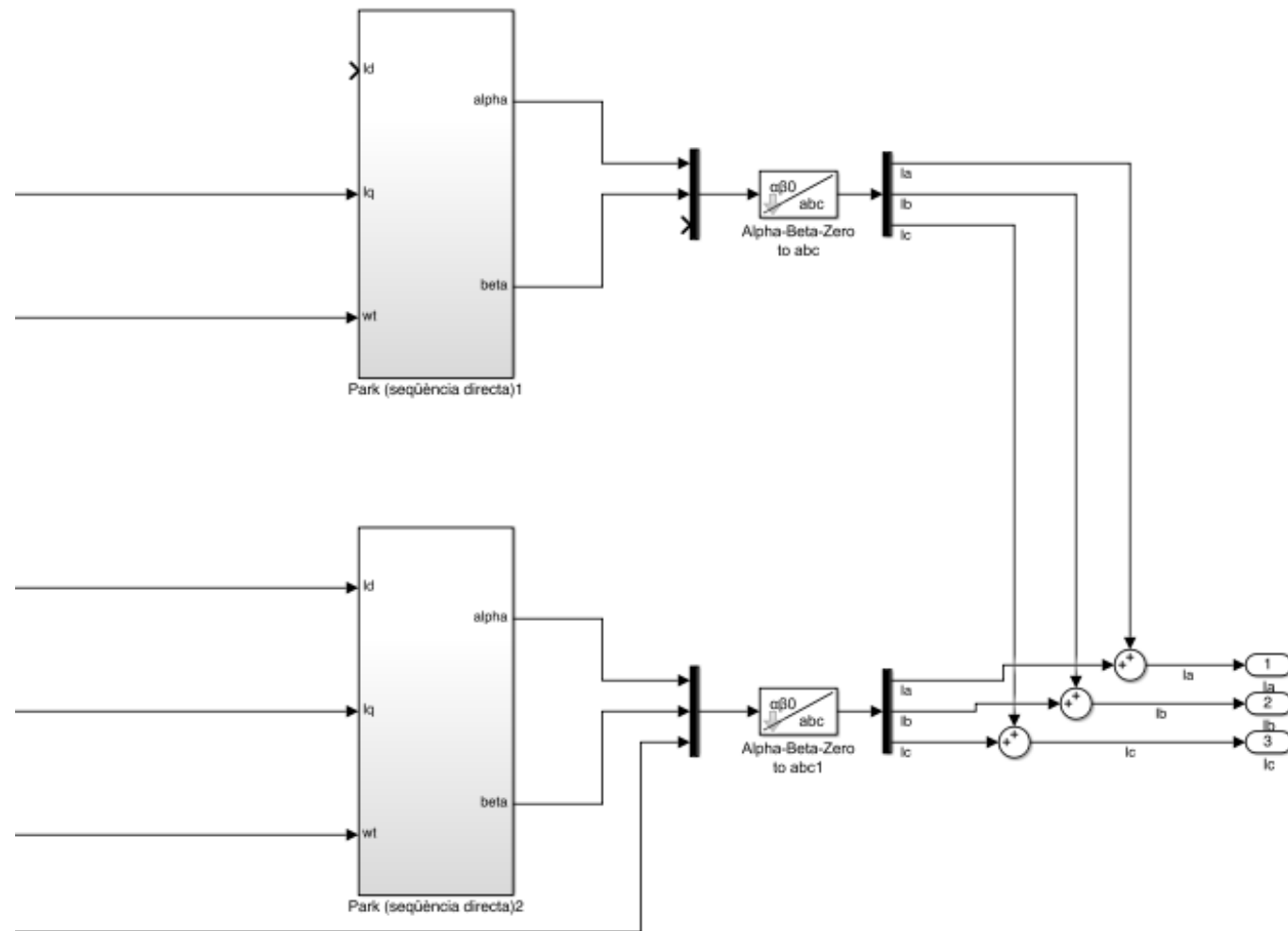


Figura 13.11 Transformacions inverses de Park i Clarke i unió de les seqüències directe i inversa per a l'obtenció de corrents que s'injectaran a la xarxa

L'equip electrònic té dues entrades: les tensions simples de la xarxa i les corrents elèctriques. La tensió es pren per saber i extreure la velocitat de la xarxa. En aquí s'ha implementat el PLL que es veu en la Figura 13.8. Consisteix en un control d'anell tancat amb un controlador PI. Es transforma la tensió amb les transformacions de Clarke i Park matrius descrites en el punt 13.1 i es força que la fase quadràtica sigui 0 per a que així el controlador es pugui enganxar a la velocitat de la xarxa i integrant la senyal trobar la fase que s'utilitza en les transformacions i transformacions inverses de Park dels corrents.

Els corrents entrant a l'equip es transformen amb la transformada de Clarke que és aplicant la matriu del punt 13.1 i després es divideixen aplicant el teorema de les components directes que és el que s'ensenya en la Figura 13.9 on les fórmules emprades estan definides al punt 13.1. La finalitat de fer aquesta separació és per aplacar els problemes de desequilibris i de consum de potència reactiva per dos camins diferents.

Un cop es tenen les seqüències directes i inverses es transformen amb la transformada de Park i es dirigeixen a un bloc de desacoblament respectivament. Aquest bloc té la missió d'eliminar les informacions repetides i l'explicació de la seva caracterització es troba a l'article [21]. En la Figura 13.10 es mostra el desacoblament per a la seqüència directe, el bloc de desacoblament per a la seqüència inversa té la mateixa aparença, però el guany que li està actuant enlloc de tenir un valor de 2 té un valor de -2.

Després del desacoblament es troba un filtre passa baix per atenuar les altes freqüències que puguin donar-se. Acte seguit els corrents desacoblats se'n van al bloc contrari de desacoblament per seguir el cicle i també es realitzen les transformades inverses de Park i de Clarke per obtenir els corrents en la base vectorial inicial. Finalment es sumen per unificar de nou les dues seqüències i obtenir els corrents que s'injectaran a la xarxa per acomplir els objectius del prototip com es pot veure en la Figura 13.11.